

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE BLIDA 1

Faculté de technologie

Département de génie des procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Option : science et génie des Matériaux.

Présenté par :

Benkradidja Manel et Ben yassed Soumia

Analyse du broyage d'un ciment portland composé

Encadreur :

Professeur Touil Djamel

Juin 2020

Résumé :

L'analyse du co-broyage et d'hydratation du mélange clinker et l'ajout du calcin (résidu du verre plat) est proposé comme étude au laboratoire. En absence d'expérimentation, le travail a été orienté de manière générale vers une synthèse bibliographique sur le broyage et l'hydratation des ciments composés. De plus, une exploitation de données de broyage et d'hydratation du clinker à ciment est effectué.

ملخص

يلعب الأسمنت دورًا أساسيًا وفعالًا في تطوير المشاريع الصناعية والإنشائية. أصبح من الضروري إيجاد مواصفات تفي بالغرض من إيجاد المواد المضافة من أجل تقليل كمية الكلنكر في الأسمنتالبورتلاندي. في هذه الدراسة رأينا تأثير البوزولانواتوفو LHF على تفاعل ترطيب الأسمنت لإيجاد الخواص الفيزيائية والكيميائية.

Summary :

The analysis of the co-grinding and hydration of the clinker mixture and the addition of cullet (residue from flat glass) is proposed as a laboratory study. In the absence of experimentation, the work was generally oriented towards a bibliographical synthesis on the grinding and hydration of compound cements. In addition, an exploitation of grinding and hydration data of cement clinker is carried out.

Sommaire

I. Introduction générale	01
Chapitre I Généralités sur la Production Industrielle du Ciment	
I-Introduction.....	02
I.1. Procédé de fabrication ciment.....	02
I.1.1 Réception et contrôle des matières premières	03
I.1.2 Dosage ,broyage ,séchage et homogénéisation du mélange cru.....	04
I.1.2.1 Propriétés d'usage du mélange	05
I.2 Cuisson du clinker.....	06
I.3 Broyage de clinker et production du ciment.....	07
I.4. Finesse et constituants du ciment	08
I.4.1 Finesse	08
I.4.2 Constituants	08
I.5 Stockage et expédition du ciment	09
Chapitre II Broyage du Clinker dans l'industrie du Ciment	
II-Introduction.....	10
II.1 Broyage de clinker et production du ciment.....	10
II.1.1 Le procédé de broyage dans un broyeur à boulets.....	11
II.1.2 Test de Bond et consommation spécifique d'énergie.....	12
1.2.1 Test de Bond.....	13
1.2.2 Utilisations pratiques des lois énergétiques.....	13
II.2 Finesse du ciment.....	14
II.3. Les ajouts dans le ciment.....	15
Chapitre III. Revue bibliographique sur le broyage et l'hydratation des ciments Composés.	
III-Introduction.....	17
III-1. Analyse de broyage des ciments composés.....	17
III.1.1. Broyabilité du clinker.....	17
III.1.2 Cinétique de broyage du clinker	17
III.1.3 Co-broyage du clinker	18
III.1.4. Cinétique de broyage du ciment	19
III.1.5 Influence des ajouts sur la cinétique de broyage du ciment CEM I	20

1_ Incorporation d'ajouts minéraux dans le ciment.....	20
2_ Cinétique de broyage des ciments composés.....	20
III.2. Hydratation des ciments composés.....	23
III.2.1 Hydratation du ciment Portland artificiel	24
2.1.1 Mécanismes d'hydratation.....	24
2.1.2 Réactions d'hydratation des composants du ciment Portland	26
2.1.3 Degré d'hydratation.....	27
2.1.4 Paramètres influençant l'hydratation du ciment.....	27
II.2.2. Influence des ajouts sur l'hydratation du ciment	28
2.2.1 Fillers calcaires.....	29
2.2.2 Poussière récupérée du four	29
2.2.3 Laitier granulé de haut-fourneau.....	29
2.2.4 Les pouzzolanes naturelles et artificielles.....	29
2.2.5 Fumée de silice.....	30
2.2.6. Données de chaleur et degré d'hydratation de ciments composés.....	30

Chapitre IV Exploitation des données bibliographiques

I-Introduction.....	32
IV.1 Finesse granulométrique du ciment et consommation d'énergie	32
IV.2 Finesse Blaine du clinker à ciment et chaleur d'hydratation	33
Conclusion Générale.....	34

Introduction générale

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par la combinaison chimique à très haute température de calcaire et d'argile. Le clinker est ensuite broyé avec des ajouts, dans des proportions précises, qui donneront au ciment des caractéristiques spécifiques.

La production de ciment en 2017 de l'entreprise publique GICA (Groupement Industriel des Ciments Algériens) atteint 13.950.660 tonnes soit une augmentation de 11% par rapport à la production de 2016. Les prévisions que se fixe le GICA pour 2020 sont d'atteindre une production de 20.000.000 de tonnes. La consommation nationale de ciment a évolué de façon exponentielle, elle a enregistré ces dernières années une dynamique particulière tirée par les investissements publics en équipement et en logements.

L'utilisation des ajouts dans la production des ciments Portland a résolu en grande partie le problème d'autosuffisance nationale, ainsi que celui de la baisse du coût énergétique. En faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciments avec les propriétés physico-mécaniques demandées. Les ajouts minéraux sont largement utilisés dans la production des ciments à travers le monde.

L'utilisation des ajouts actifs minéraux dans l'industrie cimentière présente plus d'avantages par rapport aux ajouts inertes. Les tufs sont des ajouts actifs minéraux d'origine volcanique, de la famille des pouzzolanes, les cendres, les pierres ponce, les trass et les vitrophires. Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source de minéraux actifs. Ainsi, pour le secteur cimentier national, le calcaire est essentiellement utilisé comme ajout inerte à cause de sa disponibilité à proximité des installations cimentières. Il serait souhaitable pour ce secteur industriel de rechercher et développer d'autres ajouts actifs afin de préserver le gisement du calcaire (matière première principale de ce secteur) aux générations futures.

Listes des figures :

Figure I.1. Procédé de fabrication de ciment par voie sèche.....	02
Figure I.2. Les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie	03
Figure I.3. Extraction des matières premières de leurs carrières.....	03
Figure I.4 : Atelier de concassage.....	04
Figure I.5. Pré homogénéisation et stockage des matières premières	04
Figure I.6. Broyeur à boulets du cru de la cimenterie.....	05
Figure I.7. Le clinker.....	06
Figure I.8. Ligne de cuisson d'une cimenterie.....	06
Figure I.9. Processus de cuisson.....	06
Figure I.10 : Circuit fermé de broyage du clinker.....	08
Figure I.11. Microphotographie d'un clinker.....	09.
Figure II.1. Broyeur à deux compartiments.....	10.
Figure II. 2. Perméabilimètre de Blaine	14
Figure II.3. Principe du granulomètre laser.....	14
Figure. II.4. Granulomètre laser MalvenMastersizer.....	15
Figure III.1. Surface spécifique Blaine en fonction du temps broyage.....	18
Figure III.2. X_0 et n en fonction de la Surface spécifique Blaine.....	18
Figure III.3. Evolution de la finesse Blaine de ciment CEMI en fonction du temps	19
Figure III.4. Evolution de la finesse Blaine du ciment portland composé au tuf.....	21
Figure III.5. Evolution de la finesse Blaine du ciment portland composé à la pouzzolane	21
Figure III.6. Distribution de taille des particules pour un temps de broyage de 90 mn.....	21
Figure III.7. Distribution de taille des particules pour un temps de broyage de 180 mn.....	22
Figure III.8. Courbe typique de calorimétrie isotherme d'unciment.....	25
Figure IV.1. Evolution de la distribution de taille de particules du clinker en fonction de l'énergie spécifique.....	32
Figure IV.2. Evolution de la taille médian d_{50} du clinker en fonction de l'énergie spécifique	33
Figure IV.3. Evolution de la chaleur d'hydratation du clinker en fonction de la finesse Blaine	33

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Teneurs des oxydes dans le cru	05
Tableau I.2 : Teneurs moyennes des composants secondaires.....	05
Tableau I.3. Différentes phases du clinker.....	07
Tableau I.4. Classes de résistances et domaines d'application des ciments avec ajouts.....	08
Tableau II.1: Works index moyen du clinker (Bond, 1952).....	14
Tableau II.2. Classes de résistances et domaines d'application des ciments avec ajouts	16.
Tableau III.1. Granulométrie des ciments pour un temps de broyage de 90 mn.....	22
Tableau III.2. Granulométrie des ciments pour un temps de broyage de 180 mn.....	23
Tableau III.3 :Les composants du ciment composé.....	26
Tableau III.4. Quantité de chaleur dégagée en fonction de SSB	31
Tableau III.5 Le degré d'hydratation en fonction de SSB.....	31

Nomenclature

CaO : Chaux vive .

SiO₂ : (silice),

Al₂O₃ :(alumine)

Fe₂O₃ : (hématite).

C₃S : (Cao)₃(SiO₂) ou Alite

C₃A : (Cao)₃(Al₂O₃) ; Aluminates

C₂S : (Cao)₂(SiO₂) ; Belite

CaCO₃ : Calcaire

C₄AF : Célite

C₄AF : (Cao)₄(Al₂O₃)(Fe₂O₃), Ferrite ou aluminoferrite ,on
(Cao)₂FeAlO₃

CaSO₄.2(H₂O) : Gypse

Ca(OH)₂ :Portlandite ou hydroxyde de calcium , provenant de
l'hydratation de la chaux libre.

MgO :Oxyde de magnésium .

K₂O :Oxyde de potassium.

Na₂O :Oxyde de sodium.

SO₃ :Trioxyde de soufre.

Chapitre I Généralités sur la Production Industrielle du Ciment

I_ Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principales étapes du processus de fabrication du ciment Portland composite, tout en précisant l'intérêt de broyage du clinker sur la composition finale du ciment à l'expédition pour la préparation du mortier et du béton.

I.1. Procédé de fabrication ciment

Les procédés de fabrication du ciment par voie sèche constituent à ce jour les modes d'élaboration du ciment les plus modernes et les plus performants. La fabrication du ciment Portland par voie sèche passe par différentes étapes de transformations physico-chimiques, sous l'action d'importantes quantités d'énergie tel qu'illustré en figure I.1. Elle s'effectue en deux étapes principales[1]:

- La production d'un semi-produit désigné sous le nom de clinker par cuisson de matières premières (calcaire, argile, alumine et oxyde de fer), préalablement broyés finement et mélangés dans les proportions bien définies.
- La fabrication du ciment par co-broyage du clinker avec du gypse (régulateur de prise) et éventuellement un ajout minéral.

Plusieurs types de ciments sont fabriqués. Les ciments « Portland CEMI » (ciment pur sans ajout, constitué de clinker et de gypse) et les ciments « Portland composite CEMII » (ciments avec ajouts).

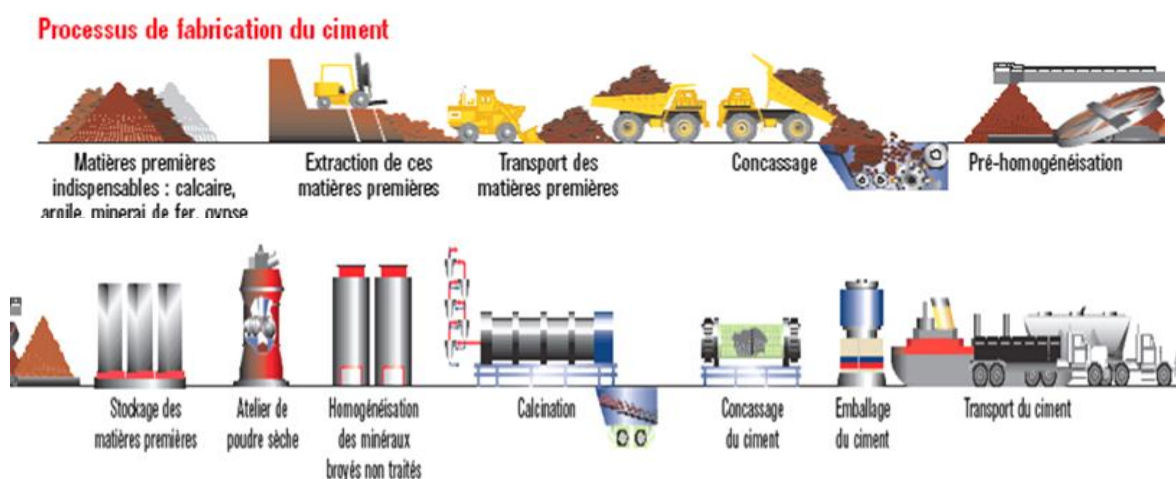


Figure I.1. Procédé de fabrication de ciment par voie sèche[2]

1.

I.1.1 Réception et contrôle des matières premières

Les matières premières principales entrant dans la fabrication des ciments portlands sont constituées de calcaire, d'argiles, de sables, et de minerais de fer (figure I.2). Les contrôles de réception des matières premières acceptées sont souvent limités à la détermination d'une ou plusieurs caractéristiques de base du matériau (titre en carbonate d'un calcaire, etc..).

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert, les carrières de calcaire et d'argile se situent respectivement à 1 km et 4km de la cimenterie. L'extraction de ces matières premières (figure I.3) se fait par abattage à l'explosif. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière.



Figure I.2. Les carrières de calcaire et d'argile de la Cimenterie



Figure I.3. Extraction des matières premières de leurs carrières.

Le calcaire abattu à l'explosif subit deux opérations de concassage (figure I.4). Un concassage primaire qui permet de réduire la granulométrie de 1000 mm à l'entrée jusqu'à 100 mm à la sortie et un second concassage qui permet de réduire la granulométrie jusqu'à 30mm.



Figure I.4 : Atelier de concassage

L'argile subit un concassage unique qui réduit la taille des particules à 30 mm. Après le concassage, une combinaison intime des différents matériaux préalablement concassés doit être réalisée, de manière à disposer d'un mélange de caractéristiques chimiques et physiques uniformes dans sa masse, cette étape est la pré homogénéisation des matières premières dans des silos de stockage (figure I.5).

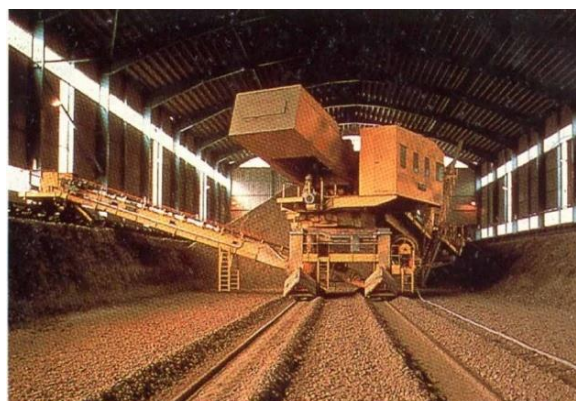
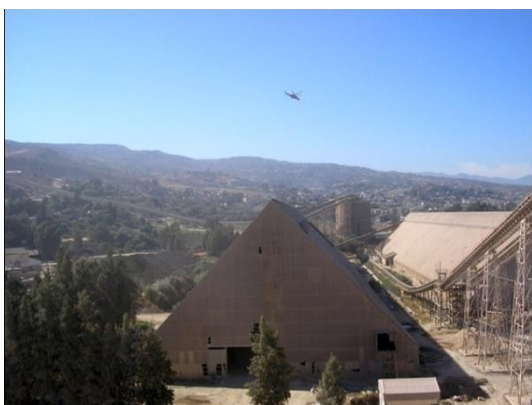


Figure I.5. Pré homogénéisation et stockage des matières premières

I.1.2 Dosage, broyage, séchage et homogénéisation du mélange cru

Le dosage précis des matériaux introduits dans le broyeur est important car il détermine la constance de la composition chimique du cru, essentielle pour la stabilité de fonctionnement du four et pour l'obtention d'un ciment de qualité. La matière première ainsi dosée, conformément aux analyses du laboratoire, est acheminée au moyen d'une bande transporteuse vers une trémie, pour être ensuite déversée dans un convoyeur d'alimentation du broyeur. Le mélange cru est broyé dans un broyeur à boulets (figure I.6) en poudre fine et séché simultanément à l'aide des gaz chauds du four et/ou de l'air d'exhaure du refroidisseur .



Figure I.6. Broyeur à boulets duc ru de la cimenterie

I.1.2.1 Propriétés d'usage du mélange cru

La préparation du cru consiste à réaliser un mélange homogène de matières premières dans les proportions permettant d'obtenir un clinker dont la composition chimique respecte les limites précisées par le tableau I.1 suivant :

Tableau I.1 : Teneurs des oxydes dans le cru [3]

Teneur %	Oxyde						
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O, Na ₂ O	SO ₃
Limite	60-69	18-24	4-8	1-8	< 5	< 2	< 3
Moyenne	65	21	6	3	2	1	1

Ce tableau indique les valeurs usuelles dans lesquelles s'inscrit la composition de cru de la cimenterie. Il faut élaborer des mélanges des matières de base, de façon à obtenir la composition chimique voulue. Des exemples de teneurs moyennes d'une farine crue industrielle sont cités dans le tableau I.2. La composition chimique de la farine crue, est déterminée au niveau du laboratoire de la cimenterie par Diffraction des rayons X.

Tableau I.2 : Teneurs moyennes des composants secondaires [3]

Element	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	SO ₃	MgO
Teneur (%)	0,5 – 1,3	0,05 -0,5	0,01- 0,02	0,1 – 0,5	< 2

La finesse optimale de broyage de cru se détermine expérimentalement, il convient cependant de noter que les meilleurs clinkers sont obtenus à partir de crus très fins. A l'échelle industrielle, la finesse de la farine crue se caractérise par un refus au tamis 90 µm de l'ordre de 5 à 20 % [3].

I.2 Cuisson du clinker

La cuisson est le processus de transformation de la farine crue en clinker, par un apport thermique suffisant, pour obtenir des réactions chimiques complètes (clinkérisation) conduisant à la formation des principaux composés de ce semi-produit (figure I.7).



Figure I.7. Le clinker

Le procédé de cuisson (figure I.8) comporte un préchauffeur à cyclones, un four rotatif et un refroidisseur à grilles. Le préchauffage de la farine crue s'effectue dans la partie supérieure du préchauffeur à cyclones. La décarbonatation a lieu dans la partie basse du préchauffeur et la partie amont du four rotatif. La clinkérisation se fait toujours dans la partie aval du four rotatif. Les gaz chauds sont produits dans le four par combustion du gaz naturel. Des ventilateurs situés après le préchauffeur et le refroidisseur aspirent les gaz à travers ces installations. Après passage dans le préchauffeur, la farine progresse vers l'aval sous l'effet de la rotation et la pente du four (3.5%). Au fur et à mesure de son acheminement, la matière s'échauffe jusqu'à clinkérisation vers 1400 à 1500°C (figure I.9). A la sortie du four, le clinker tombe dans un refroidisseur où se produisent les échanges thermiques.

Le clinker se compose essentiellement des 4 phases cristallines principales indiquées au tableau I.3. Ces phases représentent environ 95% de la masse du clinker et sont constituées par les quatre oxydes CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 . Les abréviations C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF



Figure I.8. Ligne de cuisson d'une cimenterie

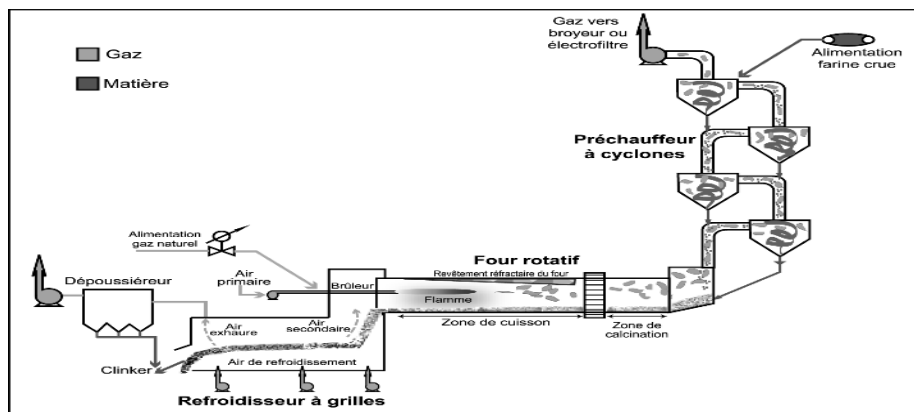


Figure I.9. Processus de cuisson[4]

correspondent réellement à des phases pures qui n'existent pas dans le clinker industriel. Chacune des combinaisons citées forme des solutions solides avec d'autres oxydes.

Tableau I.3. Différentes phases du clinker[5]

Minéraux purs	Formules	Abréviation	Minéral présent	%
Silicate tricalcique	3 CaO SiO_2	C_3S	Alite	45-65
Silicate bicalcique	2 CaO SiO_2	C_2S	Belite	10-30
Aluminate tricalcique	$3 \text{ CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminate	5-15
Ferrite d'aluminium tetracalcique	$4 \text{ CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_3\text{O}_4$	C_4AF	Alumino-Ferrite	5-15

I.3 Broyage de clinker et production du ciment

Le clinker est un semi-produit, impropre à la vente, il doit être transformé en ciment. Le ciment est obtenu par broyage des granulés de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse (4 – 5%) comme régulateur de prise et éventuellement 15 à 20 % d'un ou deux constituants secondaires. Les opérations dites de broyage du ciment ont pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains. Ce traitement développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses propriétés rhéologiques.

Le broyage du clinker est généralement réalisé en circuit fermé (figure I.10). Le refus des particules grossières quittant le séparateur est recyclé en amont du circuit de broyage afin de subir à nouveau la fragmentation dans le broyeur à boulets. Afin d'éviter le sur broyage des particules, le broyeur est traversé par un courant d'air dont le rôle est d'emporter les fines particules au fur et à mesure de leur formation. L'air sortant du broyeur contient de fines particules de matière. Celles-ci ne sont entraînées que si la vitesse du flux d'air est suffisamment élevée ; en pratique le débit d'air nécessaire est de l'ordre de 700 à 1500 Nm³/h par tonne de ciment.

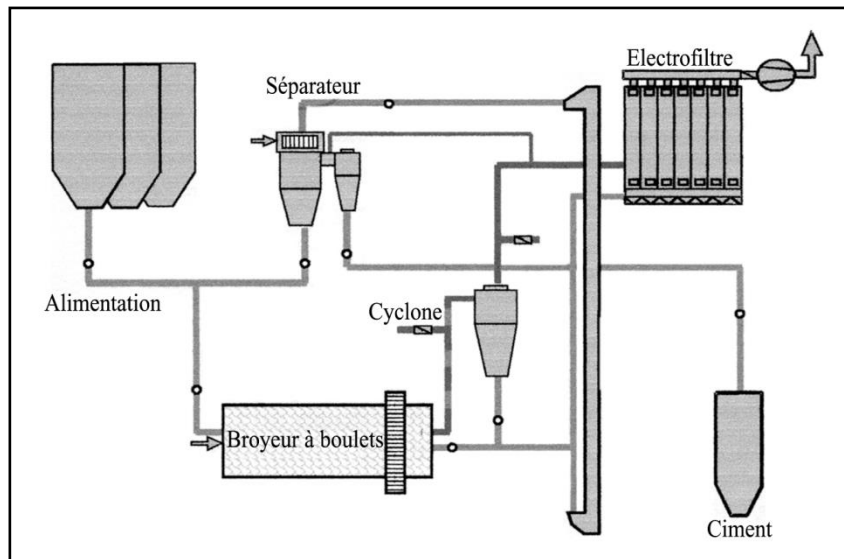


Figure I.10 : Circuit fermé de broyage du clinker [4]

I.4.Finesse et constituants du ciment

I.4.1 Finesse

La finesse du ciment lors du broyage du clinker est exprimée en termes de surface spécifique (cm^2/g), mesurée par le test de Blaine, et parfois par la courbe granulométrique. La surface spécifique Blaine est la surface totale des grains contenus dans l'unité de masse de l'ensemble des particules. La surface spécifique Blaine d'un ciment portland ordinaire, d'une valeur supérieure ou égale à $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ [6] dans l'industrie du ciment, est une condition de première satisfaction pour la préparation du béton. Plus les particules du ciment seront fines, plus la surface mouillable sera grande et plus les performances du ciment seront élevées.

I.4.2 Constituants

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Le plus important étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de chaux (Tableau I.3). La figure I.11 suivante donne une microphotographie d'un clinker portland. Le tableau I.5 donne l'identification de la couleur des différentes phases.

Tableau I.4 Couleurs des différents phases du clinker [1]

Phase	K_2SO_4	C_3A	C_3S	C_2S	CaSO_4	CaO
couleur	Jaune	Vert	Rouge	Bleu clair	Vert	Blanc

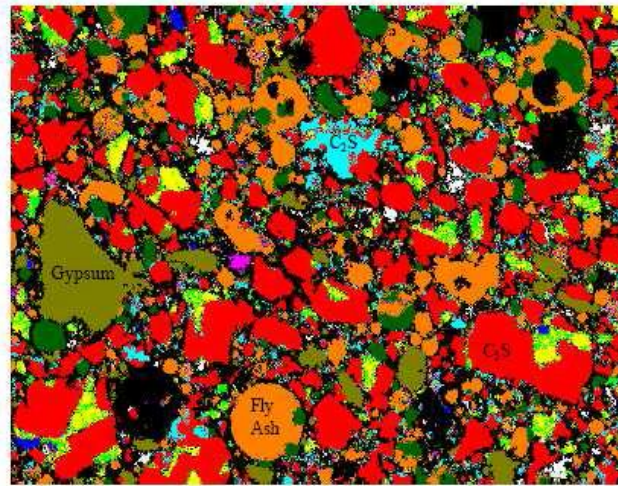


Figure I.11. Microphotographie d'un clinker [7]

Le clinker « pur » très fin est caractérisé par de courts délais de prise (3 à 5 min), ce qui le rend pratiquement inutilisable. Ce fait est surtout dû à la phase C3A qui s'hydrate rapidement tandis que ses hydrates deviennent rapidement compacts et se cristallisent. Il s'ensuit que pour ralentir la prise du ciment, il faut lier les hydro aluminates de calcium en d'autres composés. Ce rôle peut bien être joué par le gypse qui réagit énergiquement avec l'hydro aluminate tricalcique et produit un sel insoluble.

Selon leur composition, les ajouts minéraux se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des principaux minéraux du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'ajout et de la composition minéralogique du clinker.

I.5 Stockage et expédition du ciment

Après le broyage, le ciment est sous sa forme définitive, il est alors stocké dans des silos verticaux qu'il faut entretenir régulièrement. En effet au bout d'un certain temps, le ciment sèche dans les silos et s'entasse. Il faut donc qu'il se renouvelle régulièrement dans les silos afin qu'il n'y stagne pas. Pour se faire, on installe, des injections d'air dont la pression est plus forte vers l'extérieur et moins forte vers le centre du silo. En tête du silo un aspirateur d'air est également mis en place pour dégonfler le silo. Par ce procédé, le ciment acquiert les propriétés d'un fluide et ne se bloque plus, économisant des pertes qui peuvent être conséquentes. Le ciment est ensuite extrait de ces silos par un bec verseur et quitte l'usine en Sacs ou en vrac.

Chapitre II Broyage du Clinker dans l'industrie du Ciment

Introduction

Ce chapitre donne des généralités sur le broyage du clinker dans l'industrie du ciment

II.1 Broyage de clinker et production du ciment

Le clinker est un semi-produit, impropre à la vente, il doit être transformé en ciment. Le ciment est obtenu par broyage des granulés de clinker, avec addition d'un faible pourcentage de gypse (4 – 5%) comme régulateur de prise et éventuellement 15 à 20 % d'un ou deux constituants secondaires. Le broyage a pour but d'accroître la réactivité du clinker, par augmentation de sa surface spécifique et par création de défauts de cristaux en surface de grains, ce qui développe les propriétés hydrauliques du ciment et lui confère ses propriétés rhéologiques. L'opération est réalisée dans un broyeur à boulets comportant un compartiment de dégrossissage à l'entrée et un compartiment de finissage à la sortie, équipés de blindages releveurs et séparés par une cloison releveuse permettant le passage des particules broyées [6] (figure II.1). Les broyeurs à clinker modernes sont conçus pour une vitesse de rotation de 70 à 80% de la vitesse critique, avec un volume de boulets de 30% du volume du broyeur. Dans le premier compartiment, les tailles des boulets sont telles que leur porosité au repos soit minimale et leur granulométrie soit bien représentée par une loi de type Gaudin Schumann. Dans le compartiment de finissage, la granulométrie des boulets est définie par des méthodes basées sur l'indice de Papadakis, défini comme étant le coefficient d'aptitude à l'agglomération, qui représente la fraction de surface perdue à la suite de l'agglomération des particules, mesuré selon un protocole d'essais basé sur la variation de la surface spécifique en fonction de la durée de broyage[6].

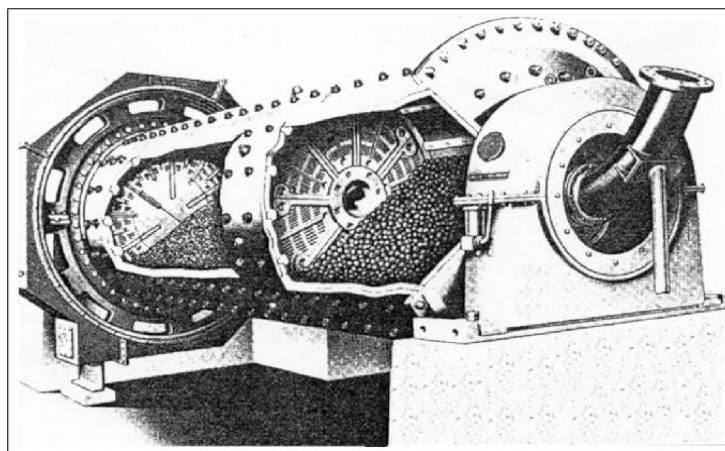


Figure II.1. Broyeur à deux compartiments.

II.1.1 Le procédé de broyage dans un broyeur à boulets

Les broyeurs à boulets, pouvant fonctionner en voie sèche et humide, ont largement fait leur preuve dans le domaine du broyage fin et très fin (de 3mm à 10 μ m) [8]. Ils ont fait l'objet de très nombreuses études, visant notamment à préciser l'influence des conditions opératoires sur les propriétés du produit fragmenté.

Un broyeur à boulets est un cylindre à axe horizontal rempli partiellement de boulets. Le cylindre est entraîné en rotation autour de son axe provoquant ainsi le mouvement des boulets. Le lit formé par les boulets et la matière qui s'y trouve, mis en mouvement par la rotation du broyeur se détend, permettant ainsi à la matière de mieux combler les vides et d'accroître la surface totale de contact. La forme de la paroi interne du broyeur doit être telle qu'aucun glissement du lit ne soit possible, mais qu'au contraire tous les boulets soient mis en mouvement. A l'intérieur du lit se produit un mouvement de friction relatif entre la matière et les boulets, qui s'apparente à une abrasion des particules.

Les différentes données de conception et d'utilisation du broyeur sont : la charge, la taille, la forme et la dureté des boulets, la forme de la paroi, le rapport entre la longueur et le diamètre du broyeur, la vitesse de rotation et le taux de remplissage en matière. Ces données doivent permettre au mode de broyage de s'accomplir de la manière la plus efficace possible.

- **Vitesse de rotation**

La vitesse de rotation, qui détermine, avec la forme et l'état des parois, la hauteur de relevage des boulets, s'exprime généralement en % de la vitesse critique, vitesse pour laquelle les boulets sont satellisés et ne retombent pas sur la matière.

La vitesse critique se calcule sur la base de l'égalité de la force centrifuge et le poids des boulets, d'après [6] respectivement :

$$\text{➤ Pour } D/d > 20 \quad N_c = \frac{300}{\sqrt{\frac{1}{2}(D-d)}} \quad (\text{II.1})$$

D et d étant respectivement les diamètres internes du broyeur et des boulets en (cm)

$$\text{➤ Pour } D/d \leq 20 \quad N_c = \frac{42,305}{\sqrt{D}} \quad (\text{II.2})$$

D en (m) et Nc est en révolutions par minute.

La vitesse de rotation optimale est généralement comprise entre 70 et 80% de la vitesse critique ; elle est fonction du taux de charge des boulets et de la quantité de matière traitée.

- **La charge broyante**

Le principe fondamental, qui conditionne la qualité du travail de la charge, est son adaptation à la granulométrie du produit tout au long de la progression de ce dernier dans le broyeur. L'adaptation d'une taille de boulets à une granulométrie donnée se traduit par le taux spécifique de broyage (vitesse de disparition des particules) correspondant. Pour une taille de particule donnée, il existe une taille de boulet optimale : des boulets trop gros vont laisser la matière filer dans les vides, et les surfaces de contact boulets/matière seront réduites ; des boulets trop petits ne possèdent pas la force d'impact nécessaire, lors du mouvement, pour fracturer les particules de matière, et ne pourront générer qu'un lent mouvement d'abrasion de celles-ci.

- **Taux de charge des boulets et de la matière**

La fraction du vide U entre les boulets, occupée par la matière peut être définie d'après Shoji et coll (1982) par l'équation suivante :

$$U = \frac{f_c}{0,4 J} \quad (\text{II.3})$$

avec :

f_c : la fraction du volume du broyeur occupée par la charge de matière ayant une porosité de 0,4

J : la fraction du volume du broyeur occupée par la charge des boulets ayant une porosité de 0,4

Cet auteur ajuste les valeurs expérimentales de la fonction de sélection, des particules de quartz, dans le domaine $0,2 \leq J \leq 0,5$ et $0,5 \leq U \leq 1,5$ par l'équation :

$$S(f_c, U) = \lambda \frac{1}{(1 + 6,6 J^{2,3})} \exp(-1,2 U) \quad (\text{II.4})$$

λ est une constante de proportionnalité.

Puis, en affinant les résultats expérimentaux, ces auteurs ont réussi à situer les capacités optimales de broyage du quartz dans les domaines $0,4 \leq J \leq 0,5$ et $0,6 \leq U \leq 1,1$.

II.1.2 Test de Bond et consommation spécifique d'énergie

Les performances d'une installation de broyage dépendent, entre autres, des caractéristiques physiques et mécaniques du produit broyé, et plus particulièrement, de la combinaison de deux phénomènes : l'aptitude à la fragmentation ou broyabilité du produit et la capacité de ré agglomération des particules broyées. La broyabilité du clinker est classiquement évaluée par le test de Bond.

1.2.1 Test de Bond

La méthode standard utilisée dans le dimensionnement des broyeurs à boulets est celle de Bond [6]. Ce test permet de déterminer le Work-Index (Wi) d'un matériau donné, appelé aussi indice énergétique. Wi est déterminé par des essais expérimentaux en laboratoire sur un protocole d'essais d'un broyeur à boulets défini par Bond (1952)[8]. Cet indice calculé par l'équation suivante, exprime la valeur de l'énergie nécessaire en kWh pour réduire une tonne du matériau étudié de la dimension X_1 , proche de 2mm à la dimension X_2 .

$$W_i = \frac{48,95}{P_1^{0,23} G_{bp}^{0,82} \left[\frac{10}{\sqrt{x_1}} - \frac{10}{\sqrt{x_2}} \right]} \quad (\text{II.5})$$

P_1 est la dimension de l'ouverture du classificateur utilisé dans le test ; x_1 et x_2 sont les dimensions en (μm) des grains avant et après broyage, choisies comme correspondant à la dimension d_{80} de la maille carrée du tamis laissant passer en masse 80% du matériau ; G_{pb} est la masse nette du produit passant par révolution du broyeur. Bond corrèle ses résultats avec ceux d'un broyeur industriel, d'un diamètre interne de 2,44m, fonctionnant en circuit fermé à voie humide avec un taux de recyclage de 2,5. Ces tests montrent que l'énergie spécifique de broyage est empiriquement liée à l'alimentation et au produit par :

$$E = W_i \left[\frac{10}{\sqrt{x_1}} - \frac{10}{\sqrt{x_2}} \right] \quad (\text{II.6})$$

Où, 10 : la racine carrée de la dimension $100\mu\text{m}$ et E : l'énergie spécifique de broyage

De plus, Bond propose pour le calcul de la puissance d'entraînement (kW) de ce type de broyeur l'équation empirique suivante :

$$P = 7,33 \text{ J N}^* (1 - 0,937 \text{ J}) \left[1 - \left(\frac{0,1}{2^{9-10\text{N}^*}} \right) \right] \rho_b \text{LD}^{2,3} \quad (\text{II.7})$$

Où, N^* : le rapport N/Nc , L : longueur du broyeur et ρ_b : densité des boulets

La capacité désirée du broyeur Q est liée à l'énergie spécifique E par l'équation :

$$P = Q E \quad (\text{II.8})$$

1.2.2 Utilisations pratiques des lois énergétiques

Seul l'indice énergétique de Bond s'est révélé d'un emploi pratique assez valable dans le cas des installations de broyage de clinker. Cependant, les marges d'incertitude au niveau du dimensionnement peuvent varier jusqu'à 50% [6]. Afin de diminuer ces marges, Bond a proposé des coefficients multiplicateurs correctifs selon le mode de broyage, le type de circuit (ouvert ou fermé), la taille du produit à l'alimentation, la finesse voulue, et le rapport de réduction taille finale / taille

initiale. Le tableau II.1 donne quelques valeurs de W_i du clinker telles que résultant d'études faites par Bond sur le broyage humide et sec.

Tableau II.1: Work index moyen du clinker (Bond, 1952)

Nombre d'essais	Densité moyenne (kg/litre)	W index moyen Voie humide	W index moyen Voie sec
60	3,09	13,49	17,54

Lors du broyage des clinkers, les lois énergétiques sur la fragmentation sont vérifiées dans un domaine de finesse Blaine bien défini. Au-delà, tout gain de finesse nécessite une énergie supérieure à ce que prévoient les lois énergétiques, en raison d'une réagglomération des grains et du colmatage des corps broyants ou des équipements internes du broyeur.

II.2 Finesse du ciment

La finesse du ciment lors du broyage du clinker est exprimée en termes de surface spécifique (cm^2/g), mesurée par le perméabilimètre de Blaine ASTM C204 - AFNOR NF P15442 (figure II.2), et parfois par la courbe granulométrique mesurée généralement par un granulomètre à diffraction laser (figure II.3 et II.4). La surface spécifique Blaine est la surface totale des grains contenus dans l'unité de masse de l'ensemble des particules. La surface spécifique Blaine d'un ciment portland ordinaire, d'une valeur supérieure ou égale à $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ [9] dans l'industrie du ciment, est une condition de première satisfaction pour la préparation du béton. Plus les particules du ciment seront fines, plus la surface mouillable sera grande et plus les performances du ciment seront élevées.

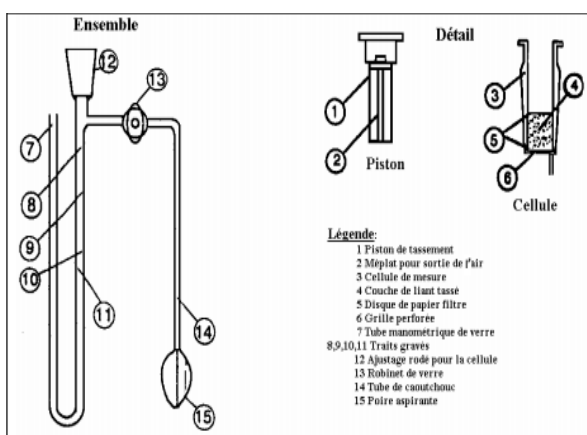


Figure II. 2. Perméabilimètre de Blaine [4]

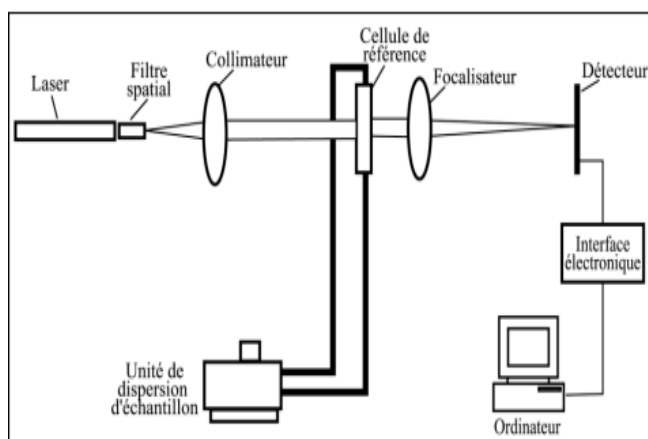


Figure II.3. Principe du granulomètre laser[4]



Figure. II.4. Granulomètre laser MalvernMastersizer[10]

II.3. Les ajouts dans le ciment

Le clinker étant obtenu par transformation du mélange (argile + calcaire) qui nécessite une dépense d'énergie calorifique très importante, l'introduction des ajouts dans la fabrication du ciment présente un facteur bénéfique, elle permet d'abaisser la consommation de ce produit semi-fini [11]. Il est actuellement admis par les cimentiers que l'utilisation des ajouts minéraux se poursuivra et se développera de plus en plus. L'intérêt technique des ajouts réside aussi, en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention d'un ciment dont les performances sont aussi bonnes que celles d'un CPA (ciment Portland) de même classe de résistance.

L'utilisation des ajouts actifs minéraux dans l'industrie cimentière présente plus d'avantages par rapport aux ajouts inertes. Les tufs sont des ajouts actifs minéraux d'origine volcanique, de la famille des pouzzolanes, les cendres, les pierres ponce, les trass et les vitrophires. Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la "portlandité" ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) du ciment qui se dégage lors de l'hydratation du C_3S , pour former des composés difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment. Les constituants secondaires ayant une réactivité moindre que le clinker Portland, les ciments composés sont broyés plus finement que les ciments purs, de 3500 à 5000 cm^2/g . Le rapport entre le clinker et l'ajout minéral est établi en fonction de l'activité de l'ajout et de la composition minéralogique du clinker. Les ciments avec ajouts actifs sont classés au tableau I.4 selon leur résistance à la compression après l'âge de 28 jours [11].

Tableau II.2. Classes de résistances et domaines d'application des ciments avec ajouts

Quantité d'ajouts actifs par rapport au % du poids du ciment	Exigences envers la composition minéralogique du clinker	Type et domaine d'application du ciment dans la construction	Classe de résistance à la compression après 28jours (kg/ cm ²)
15 à 20 %	Clinker ordinaire C ₃ S : 50 – 70 % C ₂ S : 15 – 40 % C ₃ A : 5 – 12 % C ₄ AF : 9 – 15 %	CEMI : Ciment portland d'utilisation universelle dans la construction de masse. Excepté des bétons spéciaux.	400 – 600
20 à 30 %	" "	CEMII : recommandé pour les constructions de gros ouvrages, non recommandé pour les bétons qui subissent le traitement hydrothermal.	300 – 500

Chapitre III. Revue bibliographique sur le broyage et l'hydratation des ciments Composés

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une analyse bibliographique sur le broyage et la réaction d'hydratation des ciments composés.

III-1. Analyse de broyage des ciments composés

Les performances d'une installation de broyage dépendent, entre autres, des caractéristiques physiques et mécaniques du produit broyé, et plus particulièrement, de la combinaison de deux phénomènes : l'aptitude à la fragmentation ou broyabilité du produit et la capacité de ré agglomération des particules broyées.

III.1.1. Broyabilité du clinker

Le broyage du clinker comporte des étapes distinctes, et dans chacune d'elle certains facteurs déterminent l'avancement de la fragmentation. Dans une première étape, il existe une corrélation entre la broyabilité et la porosité contenue dans l'édifice cristallin du clinker. Ensuite, pour des surfaces supérieures à 2000 cm²/g, le broyage dépend :

- des microfissurations du clinker,
- des dimensions et de la nature des cristaux de clinker

Plusieurs recherches [15] ont montré qu'il existe une corrélation entre la composition chimique et minéralogique d'un clinker et la quantité d'énergie nécessaire au broyage, en étudiant l'influence du taux de chaux libre et d'alumine sur la broyabilité de plusieurs clinkers. Dans un premier temps, ils ont pu remarquer par l'expérience que l'on peut exprimer la relation entre l'énergie de broyage et la surface spécifique atteinte avec une fonction exponentielle. Ensuite, ils ont pu déterminer que les constantes de cette fonction dépendent de la composition chimique du clinker. Cependant, il reste complexe de déterminer précisément l'effet de la composition chimique seule sur la consommation de l'énergie de broyage, car d'autres paramètres chimiques et physiques du clinker entrent en jeu. Les broyabilités comparées du clinker et des ajouts minéraux utilisés pour la fabrication de ciments composés montrent que ce constituant principal du ciment est plus difficilement broyé par rapport au calcaire et au tuf volcanique [16].

III.1.2 Cinétique de broyage du clinker :

En utilisant un broyeur de laboratoire de volume 5 litres, rempli de 8 kg de cylpebs (barres) de dimension 20×20 mm et tournant à la vitesse de rotation de 68 révolutions par minute, l'auteur [17] a montré que la variation de la surface spécifique Blaine peut être décomposée en trois étapes

distinctes. Il les dénomme les étapes de Rittinger, de l'agrégation et de l'agglomération, représentées sur la figure II.1. De ce fait, les variations de la taille caractéristique x_0 et de la dispersion granulométrique n du modèle de Rosin-Rammler (Equation II.1) pour ce matériau, en fonction de la surface spécifique Blaine sont représentées en figures II.1 et II.2.

$$y(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_0} \right)^n \right] \quad (\text{II.1})$$

Y, pourcentage de grains inférieurs à la taille X (%)

X, taille de grains (mm)

x_0 , taille moyenne de grains (mm)

n, coefficient ; uniformité sans dimension

Cette figure montre que la dispersion granulométrique présente un maximum au début de l'agrégation, où commence l'adhésion des grosses et des petites particules du clinker. Par contre, la taille caractéristique présente un minimum situé au-delà du début de l'agrégation. De ce fait, l'auteur conclut d'une part que les exigences de la qualité du ciment (finesse et résistance) ne peuvent pas être décrites par la seule étape énergétique (étape de réduction de taille), et d'autre part que les données d'investigation de la distribution de la taille des particules, ne suffisent pas à elles seules pour décrire et interpréter les phénomènes du broyage du clinker

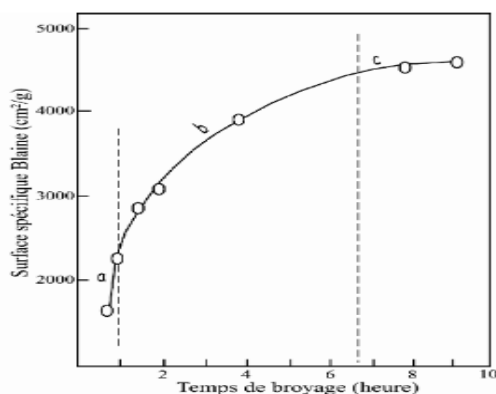


Figure II.1. Surface spécifique Blaine en fonction du temps broyage[13]

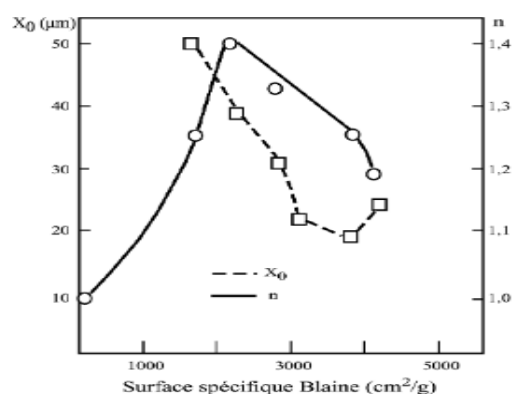


Figure II.2. x_0 et n en fonction de la Surface spécifique Blaine[13]

III.1.3 Co-broyage du clinker

La broyabilité d'un mélange de clinker avec des ajouts minéraux est généralement meilleure que celle du clinker broyé seul. Par exemple, le mélange de clinker avec du laitier de haut fourneau a une meilleure broyabilité que le clinker seul, ce qui est lié à l'effet abrasif des grains de laitier sur les grains de clinker, qui conduit à la production d'une grande fraction de grains très fins. Les classes de particules les plus grosses sont d'ailleurs les plus efficaces pour augmenter la production de fines particules du clinker co-broyé avec du laitier. Par conséquent, la broyabilité d'un mélange de matières minérales n'est pas simplement obtenue par la moyenne des broyabilités de chaque

constituant. En fait, le type d'interaction entre les différentes natures de particules dans le broyeur a un rôle majeur dans la modification de la broyabilité globale du mélange. Ainsi dans des conditions favorables, le co-broyage de clinker avec des ajouts minéraux pour fabriquer les différents types de ciments, participe à l'amélioration du rendement énergétique du broyage.

Par ailleurs, Sohoni et al [15], en considérant le broyage d'un lot de clinker hétérogène, ont montré que le broyage du clinker, avec l'addition de 4,3% de gypse, est très favorable par rapport au broyage du clinker seul. En effet, après 6 heures de broyage, l'addition du gypse fait augmenter la surface spécifique Blaine de 22% par rapport au clinker seul, pour atteindre la valeur de 594 m²/kg.

III.1.4. Cinétique de broyage du ciment

L'évolution de la finesse Blaine du ciment Portland artificiel (CEM I) sans ajout en fonction du temps est représentée en figure II-3. La surface spécifique augmente rapidement au début de broyage (jusqu'à 90min) pour atteindre une finesse de l'ordre de 3500cm²/g. Ensuite, au fur et à mesure que le processus de broyage continue, l'intensité énergétique augmente et la production de surfaces diminue. Cette diminution peut être alors interprétée par l'accumulation de fines particules, pouvant conduire à des forces de Van Der Waals très importantes, engendrant ainsi un effet d'amortissement des chocs en entourant les grosses particules et favorisant ainsi le colmatage des boulets. D'où une forte résistance à l'augmentation de la surface spécifique dans les derniers instants de broyage ; en conséquence l'apport énergétique sera principalement dissipé en chaleur [16]

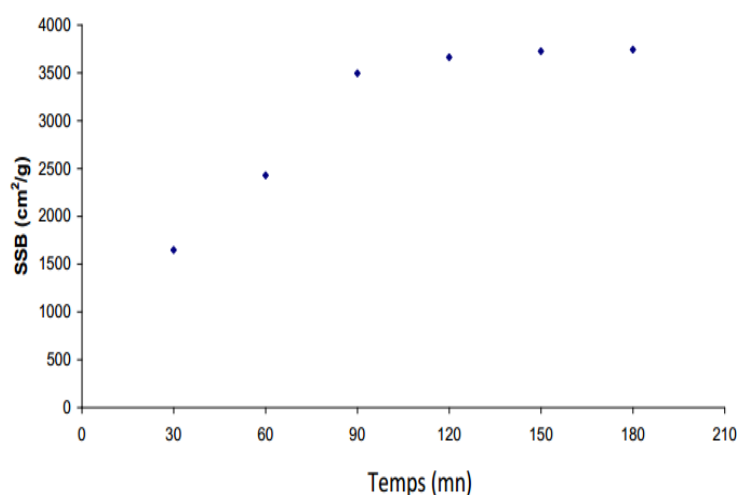


Figure II.3. Evolution de la finesse Blaine de ciment CEMI en fonction du temps [4]

III.1.5 Influence des ajouts sur la cinétique de broyage du ciment CEM I

1_ Incorporation d'ajouts minéraux dans le ciment

Compte tenu de la diversité des types de ciment demandés par le marché, les stations de broyage de la dernière génération équipées d'une séparatrice aéraulique dynamique sont les plus répandues. Les installations de broyage les plus utilisées [17] sont le tube broyeur en circuit fermé (additions minérales relativement limitées, sauf si elles sont pré- séchées ou sèches), le broyeur vertical à galets (bien adapté aux additions minérales importantes, du fait de sa capacité de séchage ainsi qu'au broyage séparé des additions minérales), la presse à rouleaux (additions minérales relativement limitées, si non sèches ou préséchés). Parmi les autres systèmes de finissage, on peut citer, le tube broyeur à sortie en bout, en circuit ouvert, le tube broyeur à sortie en bout, séparateur à cyclones (plus anciens),

le broyeur horizontal à rouleaux [17]. Le ciment est véhiculé vers les trémies des broyeurs où il est finement broyé avec 3 à 5% de gypse afin de réguler la prise. Dans certains cas, en plus du gypse, on ajoute d'autres constituants tels que le laitier de Haut fourneau, les pouzzolanes, les cendres volantes ou les fillers pour l'obtention de diverses catégories de ciment [17].

2_ Cinétique de broyage des ciments composés

L'évolution de la finesse Blaine du ciment portland composé en fonction de la durée de broyage, pour un taux d'ajout de 25% tuf et 25% pouzzolane est représentée respectivement en figures II.4 et II-5. Cette représentation montre clairement que le co-broyage du ciment portland avec ces ajouts minéraux participe à l'amélioration au rendement énergétique de fragmentation. En effet, après 1h de broyage la surface spécifique de ces ciments est de 3482 et 2767 cm²/g pour les ajouts tuf et pouzzolane, contre 2428 cm²/g pour le ciment sans ajout [16]. Ensuite, après 2h cette surface passe respectivement jusqu'à 4517 et 3917cm²/g pour les ciments CEM II, contre 3662 cm²/g pour le ciment CEM I. Etant donnée, la grande dureté du clinker devant celles du tuf et de la pouzzolane (matériaux tendres), ceci peut être expliqué que les particules de ces matériaux minéraux pouzzolaniques, sont broyées non seulement par les forces d'impact des boulets, mais aussi par leur interaction avec celles du clinker. Ce qui conduit à une importante quantité des fines du ciment co-broyé. De plus, le broyage du ciment avec le tuf est meilleur que celui du ciment avec la pouzzolane. Ceci peut être interprété par la faible broyabilité du tuf par rapport à la pouzzolane. D'autre part, on constate qu'au-delà d'une durée de 150 min, cette amélioration n'est pas significative. Elle est peut être due à la quantité de l'ajout (25%) incorporé au ciment [16].

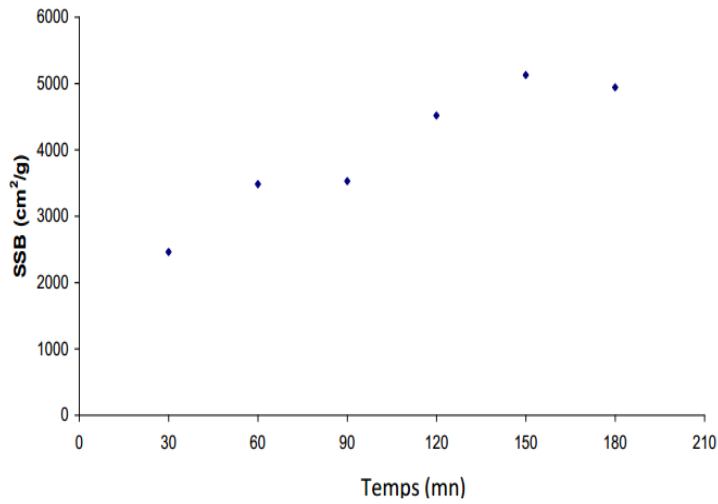


Figure II.4. Evolution de la finesse Blaine du ciment portland composé au tuf[4]

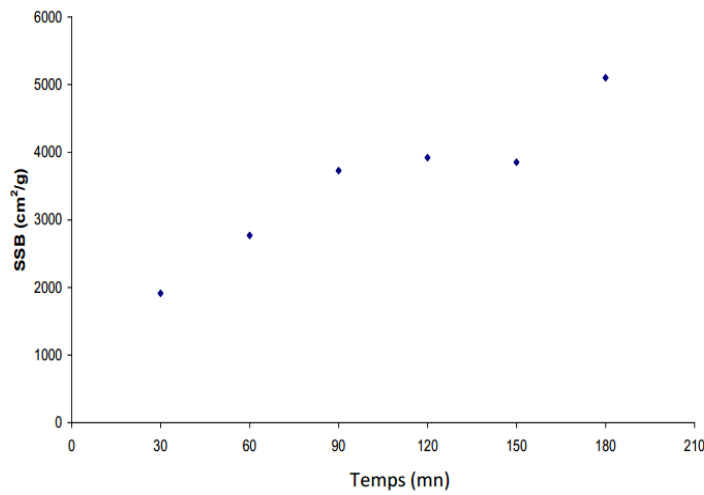


Figure II.5. Evolution de la finesse Blaine du ciment portland composé à la pouzzolane [4]

A cet effet, les distributions de taille de particules de clinker, du ciment Portland (CEMI) et des ciments composés, mesurées par diffraction laser pour un temps de broyage de 90 mn et 180 mn [16], sont représentées en figures II.6 et II.7.

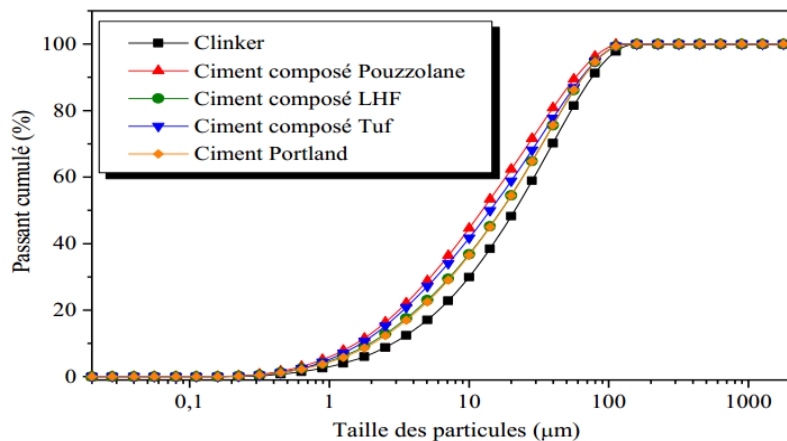


Figure II.6. Distribution de taille des particules pour un temps de broyage de 90 mn[4]

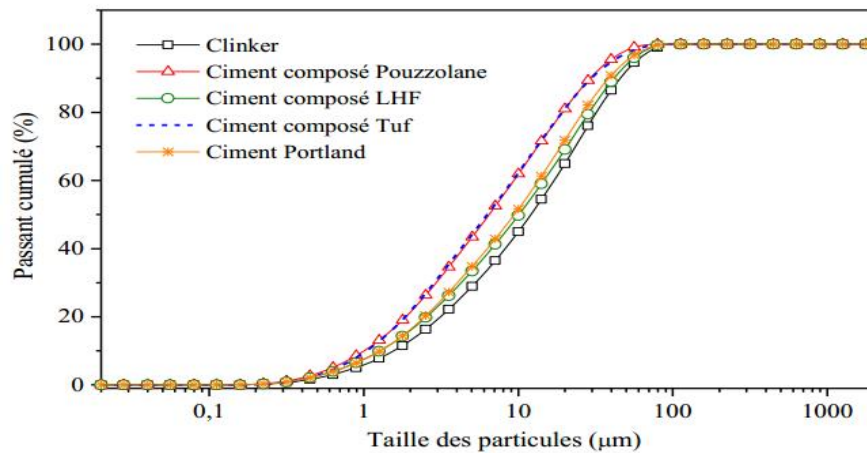


Figure II.7. Distribution de taille des particules pour un temps de broyage de 180 mn[4]

Cette représentation montre quel que soit le temps de broyage, les ciments composés au tuf et au pouzzolane produisent une quantité de fines particules plus importante que les autres ciments. La taille des particules correspondant à un passant cumulé de 50% (d_{50}) de 10µm pour le cas tuf et pouzzolane est inférieure à celle des autres ciments. A travers les tableaux II.1 et II.2, on constate que la valeur du diamètre $d(0,5)$ des grains, chute de 21,194 µm pour le clinker à 13,950 µm, pour le ciment composé à la pouzzolane. La finesse Blaine passe aussi de 2556 cm²/g à 3726 cm²/g pour le ciment composé. Ceci confirme l'effet bénéfique du co-broyage du clinker au ajouts minéraux [16]. De plus, la valeur de l'étendue de distribution, au tuf et au pouzzolane est supérieure à celle du clinker. Ce qui montre que le broyage des ciments composés produit une distribution de taille de particules plus resserrée.

Tableau III.1. Granulométrie des ciments pour un temps de broyage de 90 mn[4]

Ciments	SSB (cm ² /g)	$d(0,1)$, µm	$d(0,5)$, µm	$d(0,9)$, µm	Etendue de distribution
Clinker	2556	2,845	21,194	75,554	3,430
Ciment Portland	3495	2,296	19,160	72,705	3,674
Ciment composé (LHF)	3361	2,189	19,083	73,004	3,710
Ciment composé Pouzzolane	3726	1,745	13,950	64,881	4,525
Ciment composé Tuf	3482	1,686	14,207	63,842	4,375

Tableau III.2. Granulométrie des ciments pour un temps de broyage de 180 mn[4]

Ciments	SSB (cm²/g)	d(0,1), μm	d(0,5), μm	d(0,9), μm	Etendue de distribution
Clinker	2935	1,751	13,555	51,270	3,653
Ciment Portland	3742	1,435	10,576	43,100	3,939
Ciment composé (LHF)	3662	1,429	11,344	46,719	3,992
Ciment composé Pouzzolane	5100	1,129	7,250	32,670	4,350
Ciment composé Tuf	4940	1,170	7,068	33,199	4,531

III.2. Hydratation des ciments composés

III.2.1 Hydratation du ciment Portland artificiel

Dans la chimie du ciment, le terme hydratation regroupe la totalité des changements qui se produisent quand un ciment anhydre, ou un de ses composants, se trouve en contact avec l'eau. Ces réactions sont généralement plus complexes qu'une simple conversion en hydrates. La prise du ciment est le processus d'évolution du système vers un mélange consistant et le développement de propriétés mécaniques remarquables. Du fait la complexité du système étudié, les travaux sur la chimie de l'hydratation du ciment Portland se sont focalisés sur les phases les plus importantes.

2.1.1 Mécanismes d'hydratation :

Pour une hydratation totale, le ciment a besoin d'une quantité d'eau équivalente à 38% de son poids. Si on ajoute davantage, les couches d'eau entre les grains de ciment deviennent suffisamment épaisses pour que, même si le ciment est totalement hydraté, les produits de réaction ne puissent plus remplir entièrement les espaces entre les grains. L'excès d'eau par rapport à la stœchiométrie altère les propriétés mécaniques du matériau final [18]. Différents mécanismes ont été proposés pour rendre compte du phénomène l'hydratation du ciment. Cependant, le mécanisme le plus pertinent et toujours confirmé par les constatations expérimentales est celui décrit par Le Chatelier. C'est un mécanisme de dissolution-précipitation : lorsqu'on ajoute de l'eau au ciment, les réactifs anhydres vont progressivement passer en solution. Or, ils sont plus solubles que les produits d'hydratation finaux, ils vont donc sursaturer la solution et causer la précipitation d'hydrates. Ceci va diminuer la concentration des espèces en solution et donc permettre de nouveau un passage en solution des constituants anhydres ; le phénomène se poursuivant ainsi jusqu'à l'hydratation totale. Lorsqu'on mélange du ciment avec de l'eau, la pâte fraîche de ciment ainsi formée se présente comme un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse et les principaux mécanismes d'actions de l'eau sur la pâte de ciment sont les suivants :

- L'adsorption : fixation physique ou chimique en surface des molécules d'eau.
- L'hydrolyse : transformation du solide et décomposition de l'eau.
- Dissolution / Solvatation : rupture des liaisons ioniques dans le cristal et dispersion des ions dans le liquide qui sont rapidement hydratés.
- Cristallisation : elle a lieu en deux parties, la germination (ou nucléation) qui consiste à former des assemblages (germes) aléatoirement, puis la croissance des germes qui s'effectue par accumulation d'atomes ou de molécules en couches successives au niveau de l'interface liquide/solide [19].

La réaction d'hydratation du ciment portland avec l'eau produit un dégagement de chaleur qui peut être mesurée par calorimétrie. Le dégagement de chaleur et l'évolution de l'hydratation peuvent être

ainsi suivis dans le temps [20]. La courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment peut être décomposée en quatre périodes distinctes (figure II.8), ces périodes peuvent être décrites :

Période (I) : Réactions initiales (pré-induction) 5-10 min

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le C3S et le C3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau. Cela correspond donc à une phase de dissolution, les ions entrent en solution. **Le 1er pic** correspond au mouillage et à la dissolution ; son apparition est très rapide (quelques minutes).

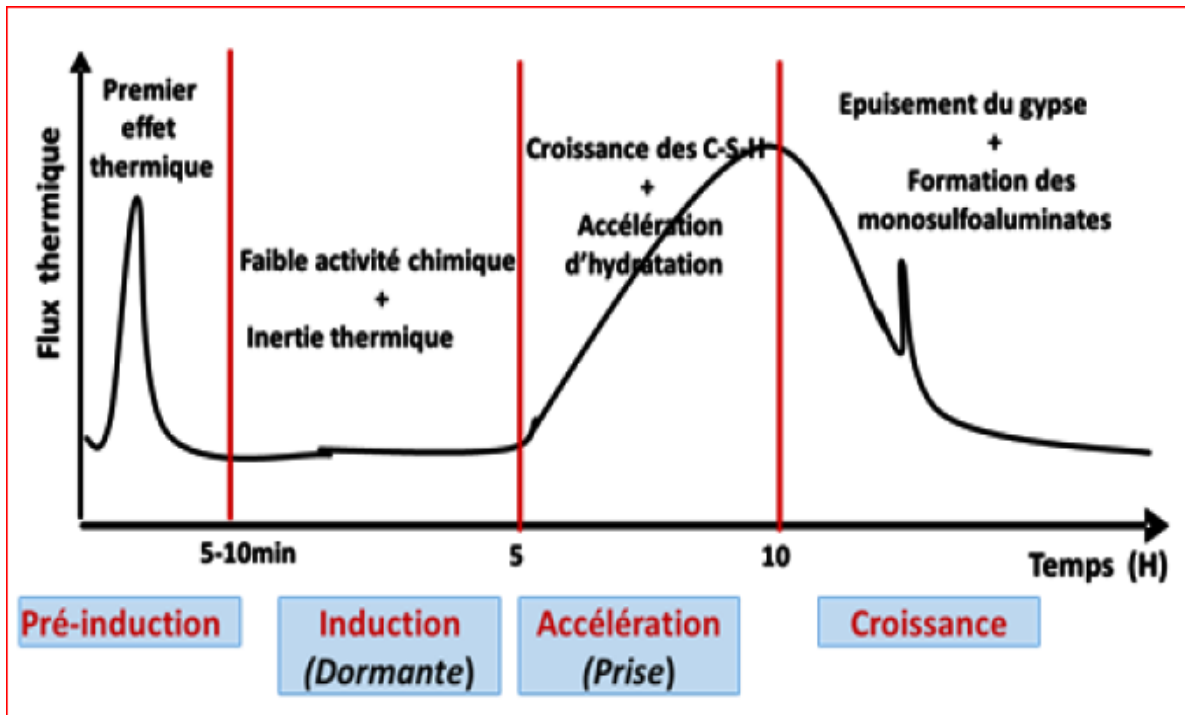


Figure III.8. Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un ciment [21]

Période (II) : période dormante (athermique). 10 min---5heure

Durant cette période, des ions Ca^{2+} et OH^- sont libérés. Ceci augmente alors le PH de la solution, ralentissant la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible. Cette période correspond à la phase durant laquelle le béton est maniable.

Période (III) : période d'accélération. 5—10 heure

Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la Portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (Ettringite, Portlandite, C-S-H). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, et augmentent la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer permettant alors la création d'un solide rigide. La prise du béton se situe donc dans

cette période. **Le 2ème pic** correspond à la formation continue d'Ettringite et à un dégagement de chaleur plus important causé par l'hydratation du C3S.

Période (IV) : période de ralentissement (croissance). 10heure----

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Cette période se traduit sur la courbe par une diminution de la chaleur dégagée. Durant cette période l'Ettringite de type AFt (Al₂O₃-Fe₂O₃-Tri) se dissout afin de se transformer en type AFm (Al₂O₃-Fe₂O₃-mono, tel que mono-sulfo- aluminat). **Le 3ème pic** correspond à la conversion de l'Ettringite en mono-sulfate ainsi qu'à la reprise d'hydratation du C3A (dont l'intensité et la rapidité d'apparition sont fonction des teneurs en aluminates, sulfates et alcalins). En général ce 3^{ème} Pic apparaît sous forme d'une bosse.

2.1.2 Réactions d'hydratation des composants du ciment Portland

Comme le ciment Portland est un mélange hétérogène de plusieurs composés, son processus d'hydratation est un ensemble de réactions simultanées des substances anhydres qui ne réagissent pas de la même manière : les aluminates sont réputés pour réagir plus rapidement que les silicates. C'est pourquoi la rigidité (perte de consistance) et la prise caractéristique à la pâte de ciment Portland sont généralement attribuées aux réactions des aluminates ; alors que les silicates, constituant près de 75 % du ciment ordinaire, jouent un rôle prépondérant dans le durcissement initial (taux de développement de résistance) du matériau.

Les réactions du ciment Portland en présence d'eau, ou hydratation, produisent des composés hydratés qui permettent de lier différentes particules de ciment et de granulat, ce qui confère au béton ces qualités de résistance mécanique. Ces réactions s'accompagnent d'effets secondaires qui peuvent produire des dégradations du matériau lorsqu'ils ne sont pas pris en compte. L'un de ces effets est la chaleur dégagée lors de ces réactions d'hydratation, dont la grandeur dépend de la composition du ciment.

Tableau III.3 :Les composants du ciment composé.

Elément	C	H	A	F	S
Nomenclature	CaO	H ₂ O	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	SiO ₂

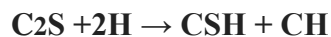
- **Hydratation de C₃S**

Le C₃S est le constituant majeur du ciment Portland artificiel. Il joue un rôle important dans la formation des hydrates et dans l'évolution des propriétés mécaniques (résistance mécanique et module d'élasticité) du matériau. Le C₃S agit principalement sur les résistances aux jeunes âges : plus le taux sera élevé plus les résistances aux jeunes âges seront importantes [22]. Les deux produits d'hydratation de C₃S sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) ou ettringite et l'hydroxyde de calcium (CH) ou Portlandité. Des études ont montré qu'environ 70% de C₃S réagit au bout de 28 jours, et qu'à peu près tout le C₃S est hydraté après 1 an pour former Ca(OH)₂ ou (CH) et du silicate de calcium hydraté (CSH). La réaction globale de C₃S avec l'eau peut s'écrire :



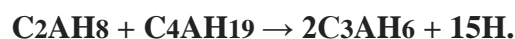
- **Hydratation de C₂S**

Le C₂S agit principalement sur les résistances à long terme. L'hydratation de C₂S est identique à celle de C₃S, mais avec une cinétique différente. Les études ont montré que le C₂S réagit de la même façon que le C₃S mais avec une cinétique plus faible [23]. Contrairement au C₃S, seule 30% de C₂S a réagi au bout de 28 jours, 90% en 1 an [24]; toutefois, il se forme une proportion plus importante de CSH et moins de CH lors de l'hydratation de C₂S que de C₃S. Cette différence de proportion d'hydrates formés est liée au rapport C/S plus faible pour le C₂S. On résume ci-dessous la réaction d'hydratation de C₂S



- **Hydratation de C₃A :**

Une pâte de ciment contenant uniquement du C₃A perd rapidement toute maniabilité, ce qui se caractérise par une prise rapide. La prise rapide de la pâte de C₃A est liée à la formation des phases hydratées intermédiaires. Ces phases évoluent ensuite vers une phase plus stable C₃AH₆ avec une cinétique fortement dépendante de la température [25]. L'addition de gypse permet de régulariser l'hydratation de C₃A et d'éviter le phénomène de fausse prise de la pâte de ciment. Les équations chimiques qui gouvernent la réaction d'hydratation de C₃A peuvent être présentées comme suit :



- **Hydratation de C₄AF :**

De nombreuses études ont montré que, dans les conditions identiques d'hydratation, les produits issus de l'hydratation de C₄AF sont similaires à ceux formés par l'hydratation de C₃A [26,27,28]. Dans le cas de C₄AF, une partie de l'aluminium est remplacée par du fer dans l'ettringite et dans le monosulfoaluminate. A température ambiante, la cinétique d'hydratation de C₄AF est 4 à 5 fois

beaucoup plus faible que celle de C3A. En effet, la solubilité de l'hydroxyde de fer en milieu basique est beaucoup plus faible que celle d'hydroxyde d'aluminium.



2.1.3 Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation est le rapport entre la chaleur dégagée au temps t , et la chaleur totale dégagée correspondant à une hydratation totale du ciment. Il existe différentes techniques pour mesurer le degré d'hydratation. La technique de sa détermination par la quantité de chaleur dégagée est une technique préconisée par Garcia dans son travail de thèse [29]. La technique se base sur le suivi de l'évolution des réactions d'hydratation par la quantification de la chaleur dégagée à l'instant t .

En supposant la synchronisation des différentes réactions d'hydratation, le degré d'hydratation « macroscopique » peut être défini

$$\alpha = Q(t) / Q_{\max} \quad (\text{II.2})$$

$Q(t)$: est la quantité de chaleur dégagée à l'instant t

$Q(a)$ est la quantité de chaleur d'hydratation dégagée pour une hydratation complète, calculée par la relation suivante :

$$Q_{\max} = q_1(M_{\text{C3A}}) + q_2(M_{\text{C2S}}) + q_3(M_{\text{C3A}}) + q_4(M_{\text{C4AF}}) + q_5(M_{\text{CaO}}) + q_6(M_{\text{MgO}}) \quad (\text{II.3})$$

$q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ les chaleurs d'hydratation des phases pures du clinker avec des sulfates pour les phases interstitielles.

Les valeurs de ces chaleurs théoriques pour les proportions des phases minéralogiques pures du clinker sont 517, 262, 1144, 418, 1166 et 850 Joules/g [30].

M : masse hydraté en g pour chaque phase [30]. Le calcul donne pour un échantillon de 1 g de clinker seul, une chaleur totale dégagée $Q_{\max} = 511 \text{ J/g de clinker}$

2.1.4 Paramètres influençant l'hydratation du ciment

De nombreux paramètres influencent significativement le déroulement et la cinétique de l'hydratation. La dynamique des réactions d'hydratation va dépendre de nombreux facteurs tels que finesse de mouture, composition, ajout d'éléments secondaires (gypse, ajouts minéraux et adjuvants), rapport Eau/Ciment, température, pression, malaxage, Ces propriétés liées aux réactions d'hydratation doivent permettre de pouvoir travailler le produit béton jusqu'à son durcissement dans un temps suffisamment court [31].

II.2.2. Influence des ajouts sur l'hydratation du ciment

Selon certains auteurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker avec de telles dimensions pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes. En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...).

2.2.1 Fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75 %. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un Ciment portland artificiel peuvent jouer un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins, un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle, un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat [32].

2.2.2 Poussière récupérée du four

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four de production de clinker. Le ciment composé avec de la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage de cet ajout [33].

2.2.3 Laitier granulé de haut-fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi et provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut-fourneau. C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé, il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités. Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été co-broyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. La réactivité du laitier peut être augmentée à titre d'exemple par un broyage poussé [34].

2.2.4 Les pouzzolanes naturelles et artificielles

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturel ou artificiel, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [35]. Avec une composition correctement ajustée, l'ajout de pouzzolane conduit bien à des bétons qui sont à classer parmi les bétons hauts performances. Il faut noter que, même après 12 mois de conservation dans les milieux plus ou moins agressifs, les caractéristiques mécaniques de ces bétons hauts performances ne sont pas affectées par les dégradations probablement grâce à la très faible porosité qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi un frein à la sortie des cations. Certains avantages techniques que présente l'utilisation des pouzzolanes dans le béton par exemple ne peuvent pas être atteints lorsqu'un ciment portland artificiel (CPA) est utilisé seul. Parmi ces avantages, une plus grande ouvrabilité, une maniabilité accrue, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend le béton plus compact), une réduction des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide.

2.2.5 Fumée de silice

La présence d'ajouts peut avoir des effets accélérateurs ou retardateur, il est admis dans la littérature que les fumés de silice conduisent, de par leur grande finesse, à la réalisation des bétons à hautes et très hautes performances, tant aux jeunes âges qu'aux âges avancés. En effet, les très fines particules de fumée de silice, peuvent combler l'espace entre les grains de ciment ce qui rend la matrice du béton plus compacte et donc améliore leur durabilité. La présence de fumées de silice devrait accélérer l'hydratation aux jeunes âges [30]. Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

2.2.6. Données de chaleur et degré d'hydratation de ciments composés

Les tableaux II.2 et II.3 ci-dessous donnent quelques données de chaleur et degré d'hydratation obtenues par microcalorimétrie DSC sur des échantillons de ciments composés au charbon, à la pouzzolane et au laitier des hauts fourneaux [30]. Le rapport eau/ciment considéré dans les expériences thermiques est de 0,35, la gamme de température choisie est de 25 à 300°C. Les résultats montrent que la variation d'enthalpie et taux maximum d'hydratation des ciments composés est directement lié à l'augmentation de la finesse Blaine et du pourcentage de l'ajout

Tableau III.4. Quantité de chaleur dégagée en fonction de SSB[30]

		Echantillons	SSB (cm ² .g ⁻¹)	ΔH _R (J.g ⁻¹)
Ciment portland sans ajout		95% clinker + 5% gypse	3713	523.945
Charbon (I)		85% clinker + 5% gypse + 10% charbon ₍₁₎	3724	283.154
		75% clinker + 5% gypse + 20% charbon ₍₁₎	5101	278.110
		65% clinker + 5% gypse + 30% charbon ₍₁₎	3001	402.484
Charbon (II)		85% clinker + 5% gypse + 10% charbon(2)	3812	471.964
		75% clinker + 5% gypse + 20% charbon(2)	4167	535.086
		65% clinker + 5% gypse + 30% charbon(2)	5128	458.314
Pouzzolane	t=120 min	70% clinker + 5% gypse + 25% pouzzolane	3917	288.412
	t=150 min	70% clinker + 5% gypse + 25% pouzzolane	3850	376.044
	t=180 min	70% clinker + 5% gypse + 25% pouzzolane	5100	398.976
laitier de Haut Fourneau	t=120 min	70% clinker + 5% gypse + 25% laitier de Haut Fourneau	2782	471.964
	t=150 min	70% clinker + 5% gypse + 25% laitier de Haut Fourneau	3682	468.654
	t=180 min	70% clinker + 5% gypse + 25% laitier de Haut Fourneau	4093	458.314

Tableau III.5 Le degré d'hydratation en fonction de SSB[30]

		Echantillons	SSB (cm ² .g ⁻¹)	α _{max}
Ciment portland sans ajout		95% clinker + 5% gypse	3713	0,374
Charbon (I)		85% clinker + 5% gypse + 10% charbon ₍₁₎	3724	0,382
		75% clinker + 5% gypse + 20% charbon ₍₁₎	5101	0,439
		65% clinker + 5% gypse + 30% charbon ₍₁₎	3001	0,44
Charbon (II)		85% clinker + 5% gypse + 10% charbon(2)	3812	0.35
		75% clinker + 5% gypse + 20% charbon(2)	4167	0.45
		65% clinker + 5% gypse + 30% charbon(2)	5128	0.48
Pouzzolane	t=120 min	70% clinker + 5% gypse + 25% pouzzolane	3917	0,41
	t=150 min	70% clinker + 5% gypse + 25% pouzzolane	3850	0,41
	t=180 min	70% clinker + 5% gypse + 25% pouzzolane	5100	0,52
laitier de Haut Fourneau	t=120 min	70% clinker + 5% gypse + 25% laitier de Haut Fourneau	2782	0,46
	t=150 min	70% clinker + 5% gypse + 25% laitier de Haut Fourneau	3682	0,43
	t=180 min	70% clinker + 5% gypse + 25% laitier de Haut Fourneau	4093	0,47

Chapitre IV Exploitation des données bibliographiques

Introduction

Ce chapitre présente une exploitation des données expérimentales de broyage [2] et d'hydratation du clinker à ciment [4] obtenus lors des travaux de thèses de doctorat.

IV.1 Finesse granulométrique du ciment et consommation d'énergie

Les données expérimentales de la distribution de taille de particules de clinker en fonction de la consommation énergétique de broyage (kWh/tonne) sont données en annexe. Nous représentons en figures (IV.1-IV.2) leurs principaux résultats. Notons, que la granulométrie de ce matériau a été caractérisée par granulométrie à diffraction laser, par contre l'opération de broyage a été effectuée dans un broyeur de laboratoire équipé d'un instrument de mesure de l'énergie consommée. On constate que le passant augmente avec la taille des particules. Cette augmentation présente une évolution brusque, ensuite elle s'atténue et enfin une constance au-delà de la taille 80 μm . La constance de cette évolution est très remarquable pour des énergies spécifiques de broyage de 43.70 et 53.20 kWh/t. On observe aussi des distributions granulométriques distinctes depuis 5.21 kWh/t jusqu'à 34.70 kWh/t, ensuite les distributions se confondent entre elles pour les deux dernières énergies spécifiques. Ce qui montre que le processus de broyage est freiné aux dernières durées de broyage. Ceci est complètement en accord avec l'évolution de la taille médiane d_{50} du clinker qui diminue brusquement pour atteindre une valeur presque constante au-delà d'une consommation spécifique d'énergie de 43.70 kWh/t.

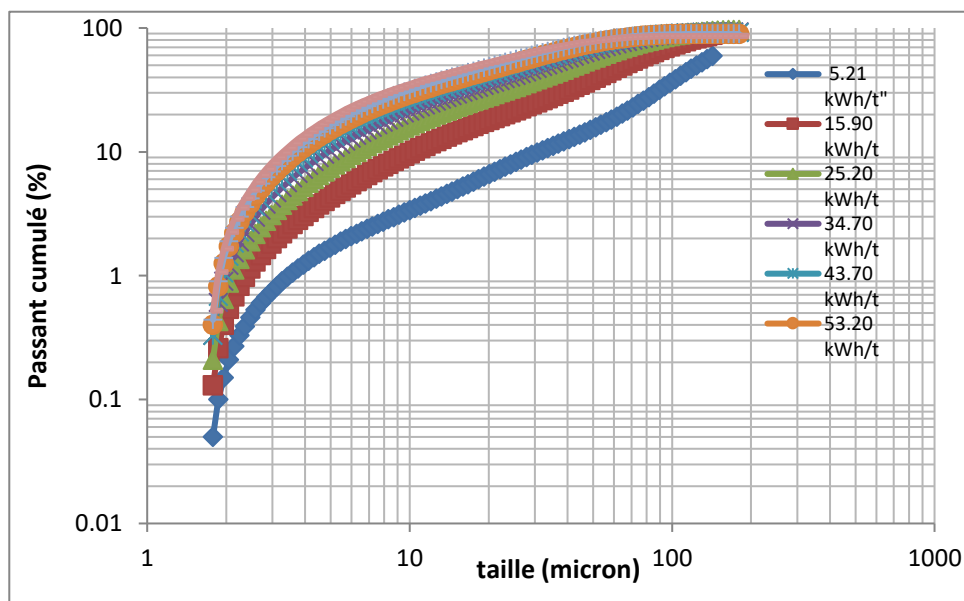


Figure IV.1. Evolution de la distribution de taille de particules du clinker en fonction de l'énergie spécifique [2]

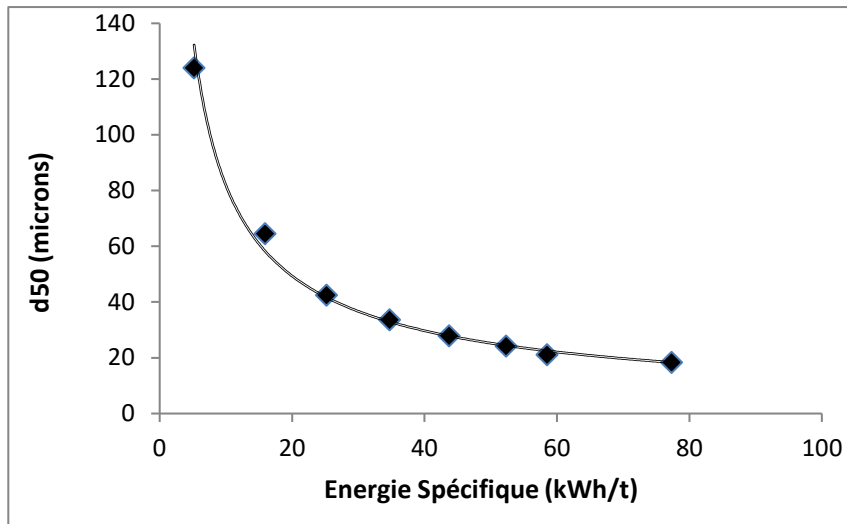


Figure IV.2. Evolution de la taille médian d50 du clinker en fonction de l'énergie spécifique[2]

IV.2 Finesse Blaine du clinker à ciment et chaleur d'hydratation

Les données expérimentales de l'hydratation du clinker à ciment pour différentes surfaces spécifiques Blaine effectuées par microcalorimétrie de laboratoire (Differential Scanning Calorimetry, DSC) sont données en annexe. La figure IV.3 illustre l'évolution de la chaleur d'hydratation du clinker en fonction de la surface spécifique Blaine. Cette représentation montre que la chaleur d'hydratation augmente linéairement avec l'augmentation de la surface spécifique Blaine (SSB). L'effet exothermique de la réaction d'hydratation du ciment et l'avancement de sa cinétique réactionnelle est toujours favorisé par un broyage poussé du clinker à ciment.

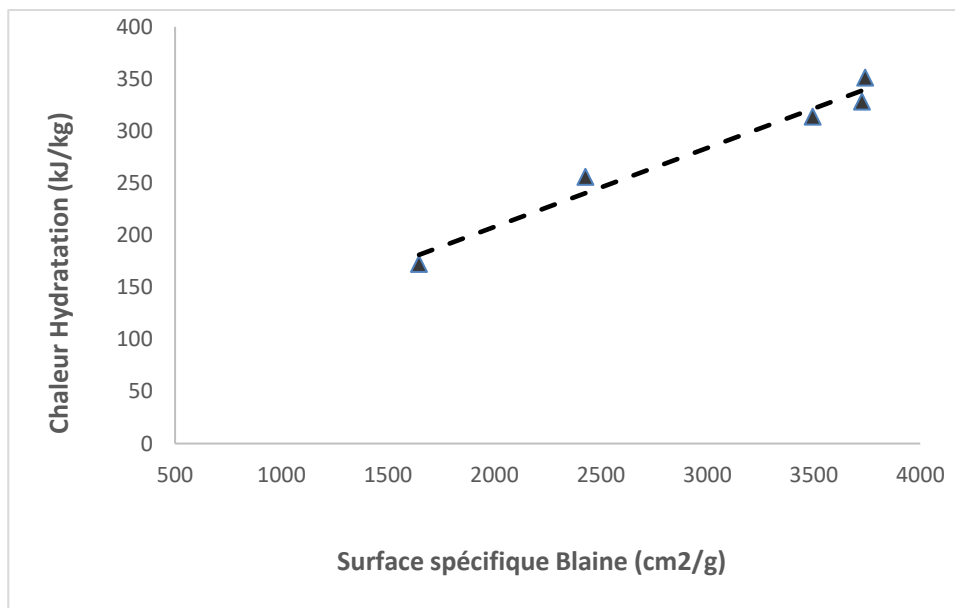


Figure IV.3. Evolution de la chaleur d'hydratation du clinker en fonction de la finesse Blaine[2]

Bibliographie :

- [1] Seidel G., Huckauf H., Jochen S. Technologie des ciments, chaux, plâtre : Processus et installations de cuisson, Septima, Paris (1980).
- [2] D.Touil, Modélisation des dégradations d'énergie dans l'industrie du ciment, Thèse de doctorat d'Etat, USTHB, Février 2006 .
- [3] Papadakis M et Venuat M., Industrie de la chaux du ciment et du plâtre, Dunod, Paris (1970) .
- [4] Bentaieb, N. Analyse des Cinétiques de broyage et d'hydratation des ciments composés, these de Doctorat, USTHB, Janvier 2014.
- [5] Pliskin L., la fabrication du ciment, ciment français, Edition Eyrolis, paris (1993).
- [6] Delubac G (coordonnateur)., Aspects théoriques du broyage, Mines et Carrières les Techniques, III-IV, (1996) 15-33.
- [7] Soumia Amina Bensafir, Mécanisme d'altération des matériaux cimentaire soumis aux milieu fortement agressifs, Université de Mascara, Algérie 2010.
- [8] Herbst J.A. et Fuerstenau D.W., Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models, Int. Journal. Min. Processing, 7, (1980) 1-31.
- [9] Philip. A Alsop : Plant Operations Hand Book for dry Process Plant, Third Edition, 2001, Trad Ship Publications Ltd
- [11] Morsli Y., Influence des ajouts minéraux actifs sur les propriétés des CPJ, mémoire de fin d'études, Institut des matériaux de construction, Boumerdès, (1988).
- [12] Tokay 1999 : strength prediction of fly ash concretes by accelerated testing , cement and concrete research 29, 1737, 1774.
- [13] Opoczky, 1996 : grinding technical question of producing composite cement, international journal of mineral processing. 1996.
- [14] Opoczky L. Fine grinding and agglomeration of silicate, powder technology, 17, (1977).
- [15] Elodie Romilliat , étude des modes d'agent de mouture sur le broyage du clinker, Mines de Saint-Etienne, 2006
- [16] Bentaib Noureddine , analyse des cinétique de broyage et l'hydratation des ciments composé algériens, 196 2014.
- [17] Nabila boualla , l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physicochimique des ciments , oran, 2011.
- [18] Ahmed Gmira. Etude structurale et thermodynamique d'hydrates modèle du ciment. Matériaux. Université d'Orléans, 2003. Français.
- [19] Le chaletier H, 1904. Recherches Expérimentales sur la consultation des Mortiers Hydrauliques , Dunod , Paris ,.

- [20] Z.SABRI, "Ciment chaleur d'hydratation et béton de masse " presented at the 3ème séminaire sur les technologies du béton 2006.
- [21] A. Bresson, "Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge," 2006.
- [22] B. Mounir, "Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux," Magister, Génie Civil Faculté des Sciences et Sciences de l'ingénieur : Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2006.
- [23] Y. TONG, H. DU, and L. FEI, "Comparison between the hydration processes of tricalcium silicate and beta-dicalcium silicate," Cement and concrete research, vol. 21, no. 04, pp. 509-514, 1991.
- [24] H. F. W. TAYLOR, "Cement Chemistry," L. Academic Press, Ed., ed, 1990.
- [25] Dr Adamah MESSAN , Liants & Béton , Ecole supérieur Polytechnique de Kaya (ESPK) , thèse 2006
- [26] H. F. Taylor, Cement chemistry. Thomas Telford, 1997
- [27] : E. Andreeva and R. Sanzhaasuren, "Investigation of processes of chemical interaction in aqueous suspensions of tetracalcium aluminoferrite in presence of gypsum dihydrate , colloid journal of the USSR, vol. 39, no. 2, pp. 197-202, 1977.
- [28] : M. FUKUHARA, S. GOTO, K. ASAGE, M. DAIMON, and R. KONDO, "Mechanism and kinetics of C4AF hydration," Cement and Concrete Research, vol. 11, pp. 407-414, 1977.
- [29] S. GARCIA-BOIVIN, "Retrait au jeune âge du béton: Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène," thèse de doctorat L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, 1999.
- [30] BENARIMA Zine el abidine , Thèse de doctorat , Etude du comportement thermique des Ciments lors du durcissement par analyse calorimétrique , USTHB juin 2019.
- [31] M. KARAI LILA , comportement thermique et énergétique des ciments lors de leur hydratation , USTHB 2013
- [32] BELHOCINE AIDA , NAGOUDI NADJAT , Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux Université Kasdi Merbah – Ouargla , Juin 2014 .
- [33] Memine MEINE , Propriétés d'hydratation, mécaniques et de durabilité des mélanges activés Laitier / Poudre de verre , Université de Mohamed Seddik Ben Yahia- JIJEL , Juillet 2019 .
- [34] DAHMANI Salah , Effet de l'association laitier-calcaire sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ciments Université Mohamed Boudiaf - M'sila , 2015/2016.
- [35] M .Venuat , La pratique des ciments, mortiers et bétons - Tome 1 , Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers , Tome2 , Collection Moniteur,1989.

Conclusion

L'exploitation des données bibliographiques correspondante à la représentation des distributions de taille de clinker en fonction de la dépense spécifique d'énergie, a permis d'identifier différentes étapes du processus de broyage. Pour atteindre la finesse Blaine désirée, cette représentation révèle que toutes ces étapes sont déterminantes pour l'évaluation de la consommation spécifique d'énergie.

Le calcul de la taille médiane d_{50} et la représentation de son évolution en fonction de la dépense spécifique d'énergie a mis en évidence une constance de sa valeur au-delà d'une consommation d'énergie de 43.70kWh/t. Cette constance est généralement traduite par les processus d'agrégation et d'agglomération de fines particules de clinker qui freinent aux derniers instants, l'avancement du procédé de broyage.

Le broyage de ciment avec le tuf est meilleur que celui de ciment avec la pouzzolane .

Les ciments composé au tuf et au pouzzolane produit une quantité des fines particules plus importante que les autres ciments.