

OBTENTION D'UN CLINKER PORTLAND CONSOMMANT PEU D'ENERGIE

Reçu le 25/01/2004 – Accepté le 20/06/2007

Résumé

L'objectif de notre travail consiste à diminuer la température de cuisson du clinker Portland par l'ajout de minéralisateurs dans le mélange des matières premières. Une série de composés chimiques purs, de matières naturelles et de déchets industriels ont été additionnés séparément aux mélanges crus de trois cimenteries algériennes (Zahana, Béni-Saf et Chlef). La plupart de ces additifs, avec un pourcentage ne dépassant pas 4% du mélange, ont pu diminuer la température de clinkerisation à 1300 °C. Leurs effets sur les propriétés hydrauliques du clinker sont cependant différents. Ceci est lié à la composition minéralogique et la structure des minéraux du clinker synthétisé. Les déchets industriels et les fluorures ont présenté une grande efficacité dans la baisse de la température de cuisson. Le phosphogypse et NaF ont amélioré la cristallisation des minéraux du clinker en formant un taux élevé d'alite. Ces caractéristiques expliquent l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques de ce clinker.

Mots clés: Ciment, clinker, alite, belite, structure, minéral, morphologie, cristallisation, résistance mécanique, chaleur de prise, activité hydraulique, température de cuisson, minéralisateur, composition minéralogique, chaux libre, matières naturelles, déchets industriels.

Abstract

The work's objective is to reduce the cooking temperature of Portland clinker by mineralizers addition to the raw materials mixture. A series of pure chemical compounds, natural materials and industrial wastes have been added up separately to raw mixture of three Algerian cement factories (Zahana, Béni Saf and Chlef). The addition of 4% of some mineralizers in the mixture decreased the cooking temperature to 1300°C, but their effect on hydraulic properties of clinker were different. This is owing to potential composition and structure of this synthetic clinker. The industrial wastes and fluorines caused great effectiveness in the cooking temperature drop, particularly phosphogypsum and NaF which improved the crystallization of clinker minerals with high alite rate. These characteristics explained the improvement of physical and strength properties of the clinker.

Keywords: Cement, clinker, alite, belite, frame, mineral, morphology, crystallization, mechanical strength, setting heat, hydraulic activity, cooking temperature, mineralizer, mineral composition, free lime, natural material, industrial waste.

L. Kacimi*
A. Ghomar***
S. Salem**
Z. Derriche*

*Laboratoire de Génie des Procédés

Faculté des Sciences

Département de Chimie

**Faculté d'architecture et de génie civil

Université des Sciences et de la
Technologie d'Oran U.S.T.O, B.P. 1505,

El M'nouar, U.S.T.O, Oran, Algérie

***Laboratoire des Matériaux

Université de Mostaganem, Algérie

ملخص

إن هذا العمل يهدف إلى خفض درجة حرارة طهي الكلنكر البورتلاندي بإضافة معدنات إلى خليط المواد الأولية. سلسلة من مركبات كيميائية نقية و مواد طبيعية و نفايات صناعية أضيفت بشكل منفصل إلى الخلائط الأولية لثلاثة مصانع إسمنت جزائرية (مصنع زهانة و مصنع بني صاف و مصنع شلف). أغلبية هذه المركبات المضافة بنسب لا تتعدى 4 % من كتلة الخليط استطاعت أن تخفض درجة حرارة طهي الكلنكر إلى 1300 °م بتأثيرات مختلفة على الخصائص المائية للإسمنت. يرجع هذا الاختلاف في التأثير إلى التركيب المعدني و الهيكل البلوري للمركبات المعدنية المكونة للكلنكر المستخلص. أشد تأثير إيجابي على خفض درجة الطهي لوحظ بإضافة النفايات الصناعية و الفلوريدات خاصة الكلس الصناعي و NaF اللذين حسنا عملية تبلور المركبات المعدنية مشكلين نسبة عالية من الأليت ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)، أهم مركب في الكلنكر، مما أدى إلى تحسين الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للإسمنت المستخلص.

الكلمات المفتاحية: إسمنت كلنكر، أليت، بيليت، هيكل بلوري، معدن، مرفولوجيا، تبلور، مقاومة ميكانيكية، حرارة القبض، فاعلية مائية، حرارة طهي، معدنات، تركيبة معدنية، كلس حر، مواد طبيعية، نفايات صناعية.

Dans l'industrie du ciment l'énergie thermique et mécanique a toujours représenté un élément de base pour le calcul du prix de revient que les technologues ont de tout temps cherché à réduire.

La mobilisation des grandes quantités d'énergie est cependant dans la nature même de cette industrie qui consiste à activer des matériaux naturels stables en les portant à un potentiel énergétique suffisamment élevé pour les rendre instables en présence d'eau.

En 1986, la fabrication de 820 millions de tonnes de clinker dans le monde a demandé 100 millions de tonnes équivalent pétrole et 60 milliards de kilowatt heures électriques [1]. Les retombées des économies réalisées dans la consommation énergétique pour la fabrication du clinker atteignent une dimension exceptionnelle ; il s'agit donc d'un objectif de première importance pour tous les organismes de recherches qui travaillent dans ce domaine.

Dans le but d'accroître l'activité du ciment, certaines solutions sont préconisées ; à savoir un broyage poussé de la matière première, une meilleure homogénéisation du cru, la minimisation des pertes énergétiques du four et l'amélioration du rendement des échangeurs. La pratique à l'échelle industrielle a montré que ces solutions sont techniquement difficiles.

Dans cette recherche nous nous sommes axés à l'étude d'un des volets de diminution de la dépense d'énergie, pour cela nous avons opté pour le choix adéquat de la composition minéralogique et pour l'usage de minéralisateurs.

Les minéralisateurs sont des substances, dont leur présence dans la farine crue accélère et intensifie la formation des phases du clinker et la combinaison le la chaux libre durant la cuisson. Quoi que de nombreux constituants principaux du mélange cru aient certaines influences sur la cinétique de clinkérisation, le terme minéralisateur est normalement appliqué pour des substances qui sont intentionnellement ajoutées au mélange afin d'accélérer le processus de cuisson. A cause de l'effet catalytique de ces mélanges, la température de clinkérisation et le temps de cuisson peuvent diminuer [2].

Selon la littérature, il apparaît que le fluorure de calcium (CaF₂) et d'autres composés de fluorures accélèrent fortement le processus de clinkérisation [3], mais certains effets d'accélération sur les réactions sont aussi observés pour d'autres substances [4].

Dans ce travail, une série de composés chimiques purs, de matières naturelles et de déchets industriels ont été étudiés. Nous avons analysé la relation existante entre le taux de chaux libre et, d'une part la température de cuisson et d'autre part le pourcentage de minéralisateur ajouté.

I- EXPERIMENTATION

Dans le but d'étudier l'effet des minéralisateurs sur la clinkérisation à l'échelle industrielle, nous avons choisi trois mélanges crus (MCZ, MCB, MCC) des cimenteries algériennes de Zahana, Béni-Saf et Chlef successivement,

dont leurs compositions chimiques sont présentées dans le tableau 1.

Farine crue de	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	reste
ZAHANA (MCZ)	66,33	22,90	4,27	2,60	1,58	0,68
BENI-SAF (MCB)	65,67	21,98	5,47	3,63	0,54	2,70
CHLEF (MCC)	65,40	19,15	4,70	4,49	0,30	5,95

Tableau 1 : Compositions chimiques des trois farines crues sans perte au feu.

Les minéralisateurs additionnés à ces mélanges, avec des pourcentages variables (0.25, 0.50, 1.00, 1.25, 2.50, 3.00, 3.50 et 4.00 %), sont des substances chimiques pures (tab.2),

Oxydes	Sulfates	Chlorures	Carbonates	Fluorures
ZnO, CuO, BaO, MgO, PbO, TiO ₂ , MnO ₂ , Ni ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , V ₂ O ₅ , Co ₂ O ₄	Al ₂ (SO ₄) ₃ , FeSO ₄ , ZnSO ₄ , MgSO ₄ , CaSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , K ₂ SO ₄	FeCl ₃ , CaCl ₂ , BaCl ₂ , NaCl	BaCO ₃ , Na ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃	CaF ₂ , NaF, KF

Tableau 2 : Corps purs utilisés comme minéralisateurs

des matières naturelles : phosphate (PHO) et pouzzolane (POZ) ainsi que des déchets industriels : phosphogypse (PG), cendres volantes (CV), laitier du haut fourneau (LAI) et débris de verre (DV), (tab.3).

Constituants	Pourcentages massiques					
	DV	CV	PG	LAI	PHO	POZ
SiO ₂	70,94	8,11	17,48	36,97	3,25	42,05
Al ₂ O ₃	1,43	2,52	0,13	5,50	0,56	15,25
Fe ₂ O ₃	0,12	70,38	0,05	4,34	0,55	22,16
CaO	8,69	6,70	14,07	40,54	48,22	10,22
F	/	/	/	/	3,81	/
MgO	3,76	6,12	0,01	6,27	1,64	3,72
SO ₃	0,34	0,06	20,06	0,33	4,05	/
P ₂ O ₅	/	/	3,19	/	28,25	/
K ₂ O	0,17	0,03	1,18	0,20	/	/
Na ₂ O	7,87	0,02	10,31	0,08	/	/
PF	0,26	/	33,36	/	7,14	7,40

Tableau 3 : Compositions chimiques des corps complexes.

Le développement de la formation du clinker a été étudié principalement sur la base de la chaux libre contenue dans les échantillons cuits. La formation du clinker sera complète quand le taux de chaux libre, initialement formée par décomposition du calcaire, est inférieur à 1%. Une étude effectuée antérieurement par nos soins sur la variation du taux de chaux libre dans le clinker en fonction du pourcentage de minéralisateur ajouté, nous a permis de définir les teneurs donnant les meilleurs résultats. Nous avons trouvé que 1% du corps pur ou 4% du corps combiné sont des pourcentages optimaux à

OBTENTION D'UN CLINKER PORTLAND CONSOMMANT PEU D'ENERGIE

utiliser pour étudier l'effet du minéralisateur sur la température de clinkérisation.

Ainsi, le minéralisateur est additionné, à la farine crue pour préparer 3 g d'un mélange homogène. Ce mélange, est mis dans un creuset en alumine, puis placé dans un four à moufle pour une cuisson à la température désirée pendant 30 minutes, avant d'être refroidi brusquement à l'air. L'échantillon obtenu doit subir un broyage avant d'être analysé pour déterminer le taux de chaux libre qu'il renferme selon la norme NE-2-1-015-1984.

Nous avons ensuite déterminé les compositions minéralogique et chimique des clinkers à différentes fractions ainsi que leurs structures en utilisant le microscope optique de type « ZEISS », le microscope électronique à balayage de type « EDAX HITACHI 52500 », la diffraction des rayons X « type PW1710 BASED » et la fluorescence-X (type PW 1404 X).

II- RESULTATS ET DISCUSSIONS

II-1- Effet des fluorures

Tous les fluorures utilisés (KF, NaF, CaF₂) ont joué un rôle intéressant dans la diminution de température de clinkérisation pour les trois types de farines crues (fig.1).

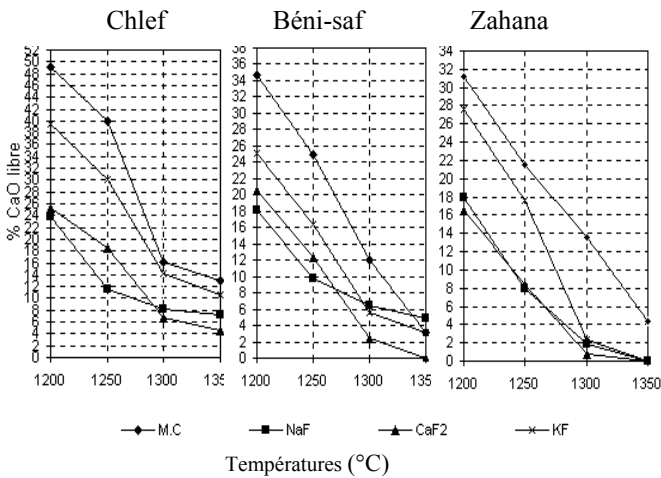


Figure 1 : Influence des fluorures sur la température de clinkérisation de MCC, MCB et MCZ

Le taux de chaux libre est réduit et atteint des valeurs faibles même à des températures de cuisson inférieures à 1300°C, ce qui signifie la formation de C₃S à ces basses températures. La présence de fluorures, non seulement accélère la formation du clinker, mais aussi diminue la valeur limite inférieure de stabilité des phases.

Cette efficacité est due essentiellement à la présence de l'anion F⁻ qui entre en interaction avec les ions de la surface des solides et la déforme. Cette surface maintenue à un état énergétique élevé abouti à la polarisation, la déformation et le réarrangement des atomes, ce qui

augmente l'activité de ces solides soit pour former des nouvelles phases, soit pour provoquer sa fusion [5].

II-2- Effet des sulfates

Pour les composés sulfatés, leur influence est remarquable, et dépend de la nature des cations. Elle augmente avec l'augmentation de la valence du cation (fig.2). Les sulfates de calcium (CaSO₄) diminue

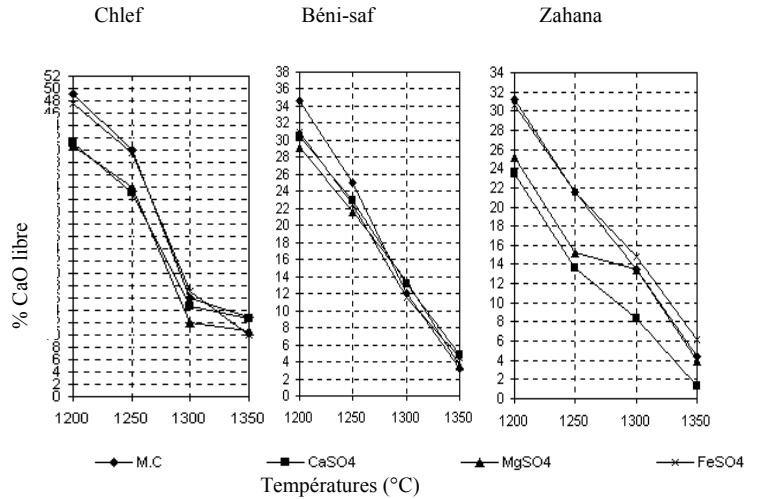


Figure 2 : Influence des sulfates sur la température de clinkérisation de MCC, MCB et MCZ.

II-3- Effets des chlorures et des carbonates

Par ajout des chlorures dans les mélanges crus des 3 cimenteries (MCC, MCB et MCZ) le phénomène inverse est observé. Le taux de chaux libre à différentes températures est plus élevé par comparaison avec le clinker sans ajout (fig.3). Par contre Na₂CO₃ joue un rôle intéressant dans la cuisson du mélange cru de Béni-Saf.

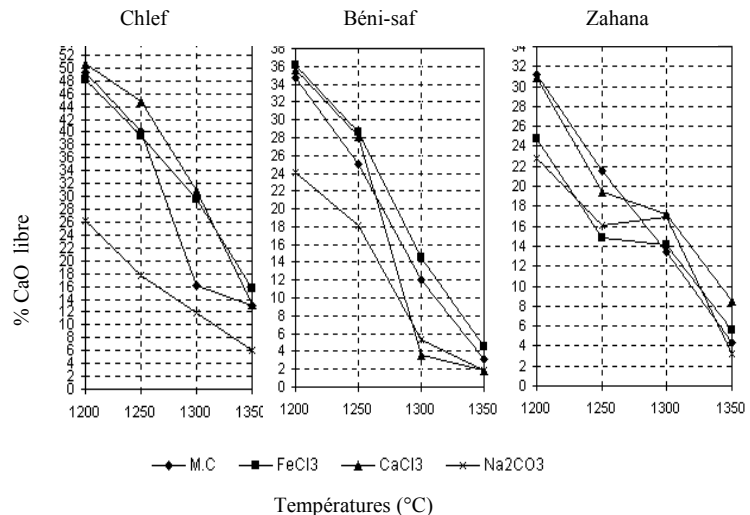


Figure 3 : Influence des chlorures et des carbonates sur la température de clinkérisation de MCC, MCB et MCZ.

II-4- Effet des oxydes

L'efficacité de la plupart des oxydes s'améliore quand leur taux dans le mélange augmente et varie selon la nature des cations. A l'exception de l'oxyde de magnésium, les autres oxydes influent favorablement sur la combinaison de la chaux par comparaison avec les sulfates, ceci apparaît clairement avec l'oxyde de zinc (fig.4).

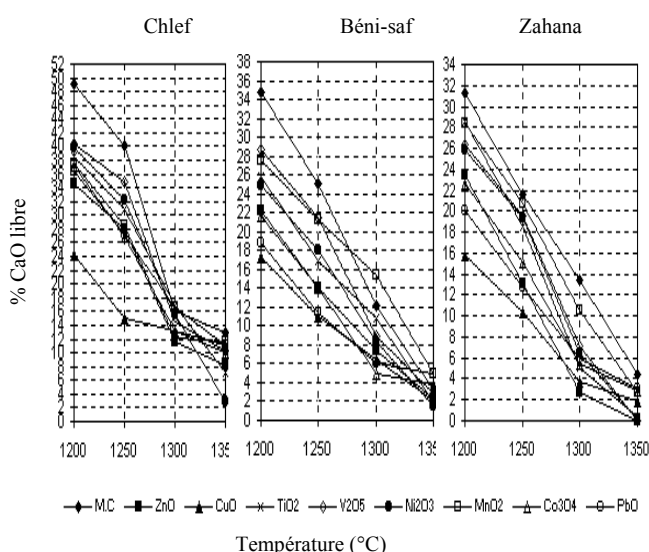


Figure 4 : Influence des oxydes sur la température de clinkérisation de MCC, MCB et MCZ.

II-5- Effets des déchets industriels

Le déchet de verre favorise la synthèse complète du clinker à des températures se situant entre 1300 et 1350°C. Ceci est dû à la fusion du verre à basse température favorisant ainsi, l'apparition d'une phase liquide permettant la formation de l'alite. Le taux de silice que renferme ce minéralisateur contribue à la formation des silicates calciques en diminuant le taux de chaux libre dans le mélange (fig.5). Néanmoins le taux de l'alite dans ce clinker est très faible contrairement à la bélite (tab.3) et par conséquent, son activité hydraulique serait très faible (tab.4).

Clinker Phase	CPG 4-1200	CDV 4-1300	CLA 4-1350	CCV 4-1350	CPh 4-1350	CPOZ 4-1350	CNF 1-1300	CCaF ₂ 1-1300
C ₃ S	56	24	49	54	48	48	55	52
C ₂ S	25	57	33	28	33	33	25	28
C ₃ A	6	7	7	5	6	7	8	6
C ₄ AF	11	8	9	11	10	10	9	11

Tableau 4 : Composition minéralogique des clinkers synthétisés

L'ajout de 4% de cendres volantes dans les différents crus favorise la clinkérisation complète à 1350°C. Ceci est dû à la présence de fortes teneurs en silice, caractérisée par une grande dispersion et une grande activité, de l'oxyde de fer et d'autres fondants capables d'améliorer le milieu réactionnel (fig.5).

Le laitier apparaît moins efficace que les cendres volantes malgré sa forte teneur en oxyde de fer et en silice (tab.2). Mais l'existence de fortes teneurs de chaux et magnésium dans sa composition chimique réduit l'effet sur la baisse du taux de chaux libre, même à des températures élevées (fig.5).

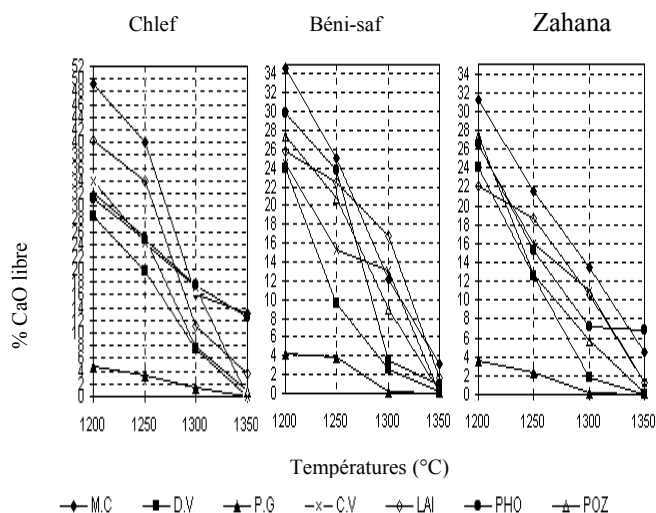


Figure 5 : Influence des déchets et des matières naturelles sur la température de clinkérisation de MCC, MCB et MCZ.

II-6- Effets de certaines matières naturelles

Le phosphate naturel est un minéralisateur efficace dans le processus de clinkérisation notamment du MCB et MCZ. Il accélère la combinaison de la chaux dans les intervalles de température (1250-1300°C) pour le premier mélange et (1250-1350°C) pour le deuxième. Il abaisse la température de synthèse à des valeurs voisines de 1350°C. Ces avantages sont expliqués par la présence d'un taux élevé (28,25%) de P₂O₅ dans le phosphate (tab.2). Cet oxyde est très connu par son effet minéralisant. Par contre, il présente peu d'efficacité sur la cuisson de la farine de Chlef entre 1300 et 1350°C. Ceci est dû probablement à la quantité insuffisante de la silice qui ne permet pas de consommer toute la chaux du mélange (fig.5).

La pouzzolane présente un meilleur effet, elle réduit la température de clinkérisation à 1350°C avec un taux faible en chaux libre (fig.5).

II-7- Effet du phosphogypse

Le phosphogypse permet une clinkérisation complète à des températures inférieures à 1250°C (fig.5). Il se

OBTENTION D'UN CLINKER PORTLAND CONSOMMANT PEU D'ENERGIE

distingue parfaitement des autres ajouts, et se comporte comme minéralisateur le plus adéquat des crus des 3 cimenteries Zahana, Béni-saf et Chlef. Cette efficacité trouve son explication dans la composition minéralogique de ce clinker formé de malladrite (Na_2SiF_6) et de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ces deux substances sont très connues par leur effet minéralisant [6] ; le premier du groupe des fluorosilicates est considéré comme le meilleur minéralisateur, son effet ne diffère pas de celui du NaF (fig.1), alors que le deuxième présente certaines qualités de minéralisateur (fig.2). D'autre part, l'efficacité du phosphogypse peut être expliquée par sa composition chimique renfermant des fondants en l'occurrence, Na_2O , P_2O_5 et SO_3 (tab.2), qui active la formation de l'alite (C3S). Ainsi la teneur élevée en silice dans ce minéralisateur favorise la combinaison de la chaux à températures basses.

III- INFLUENCE DES MINERALISATEURS SUR LES PROPRIETES DU CIMENT

Afin d'étudier l'effet des minéralisateurs sur la formation des minéraux du clinker, nous avons additionné les plus efficaces d'entre eux (sur la baisse de température de cuisson), à la farine crue de Zahana (tab.4). Les résultats obtenus confirment l'effet favorable des corps complexes, à l'exception du déchet de verre dont le taux de l'alite est très faible. Ainsi, certains corps purs (CaSO_4 , ZnO , CaF_2 et NaF) améliorent le taux de C3S dans le mélange cuit. L'addition de ces minéralisateurs dans la cuisson du clinker n'a pas d'effet néfaste sur ses propriétés physiques, à l'exception du phosphate naturel et CaF_2 qui ont augmenté fortement l'expansion du ciment (tab.5). Ainsi, il a été constaté que NaF et CaSO_4 améliorent fortement la résistance mécanique à la compression (RC) et à la flexion (RF). Ceci explique l'effet favorable du phosphogypse sur cette propriété.

IV- ETUDE STRUCTURALE ET MORPHOLOGIQUE

Les analyses structurale et morphologique du clinker (figs.6,7) montrent que le phosphogypse conserve la cristallinité des phases silicatées du clinker tout en favorisant, à basse température, la formation de l'alite avec un grand nombre d'inclusion et la bélite sous la forme β , ce qui a permis d'améliorer son activité hydraulique (tab.5).

Tableau 5 : Résistances mécaniques en (kgf/cm^2) et propriétés physiques des clinkers synthétisés

Clinker	CPG 4-1200	CDV 4-1300	CLA 4-1350	CCV 4-1350	CPh 4-1350	CPZ 4-1350	CNaF 1-1300	CCaF ₂ 1- 1300	CCaSO ₄ 1- 1350	CZnO 1- 1300	COZ 0-1470
RC (2J)	163.7	133.4	120.2	125.6	122.8	115.5	124.6	165.9	158.4	134.6	169
RC(7J)	304.6	217.1	260.3	275.3	242.1	266	285	263.7	215.9	210.3	332
RC(28J)	440	494	372	370	298	383	580	322	504	274	431
RF (2J)	37.5	20	75	25	15	22	25	36.25	20	22.50	35
RF(7J)	56.25	33.75	85	46	36.25	47.5	45	39	32.50	32.50	62.50
RF(28J)	73	53	96	58	35.7	58	65.4	43	51.4	38	70
DP(h : min)	5:30	4:55	5:07	5:08	5:50	4:45	4:15	6:05	3:50	6:15	3:55
FP (h : min)	7:29	8:05	6:14	7:02	7:32	8:30	6:50	7:43	5:55	8:15	5:45
E (mm)	00	00	02	00	19	00	00	00	00	05	00

CONCLUSION

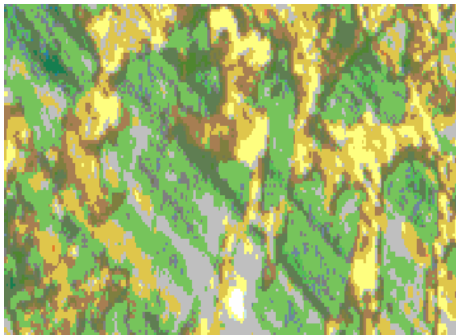
Cette étude nous a permis d'examiner l'effet de certains minéralisateurs, de natures et pourcentages différents, sur la température de cuisson du clinker portland et leur influence sur ses propriétés hydrauliques. Ainsi, nous avons tiré les conclusions suivantes:

- Les sulfates sont des minéralisateurs adéquats notamment CaSO_4 qui conserve les propriétés mécaniques et physiques du produit.
 - Les oxydes ont un effet minéralisant considérable, notamment ZnO qui peut réduire la température de clinkérisation à 1300°C , mais il joue un rôle défavorable sur la qualité du ciment.
 - Tous les fluorures sont des minéralisateurs par excellence. Ils peuvent diminuer la température à moins de 1300°C , tout en préservant les propriétés du clinker portland.
 - Le déchet de verre diminue fortement la température de clinkérisation. Et malgré qu'il ait un effet néfaste sur la formation d'alite, il peut préserver la résistance mécanique à long terme.
 - Les matières naturelles (phosphates et pouzzolane), du fait de leur très bas prix, ont été examinées dans cette étude. Mais, malgré qu'elles diminuent la température de clinkérisation à des valeurs voisines de 1350°C , affaiblissent légèrement la résistance mécanique du ciment.
 - Les déchets industriels que nous avons utilisés ont présenté des résultats considérables ; ils ont permis la baisse de la température de clinkérisation et la conservation de la qualité du produit, notamment le phosphogypse qui a diminué la température de clinkérisation de 250°C par l'ajout de 4% dans le mélange tout en améliorant les propriétés du ciment.
 - Ces caractéristiques, en plus de son coût très bas, nous poussent de l'utiliser comme minéralisateur dans la production du clinker portland puisqu'il permet de réduire les dépenses en combustible, d'augmenter la productivité du four, de diminuer les dépenses d'énergie électrique, d'accroître la durée de service de la brique réfractaire, d'éviter l'occlusion du four par la condensation des alcalis volatils et d'améliorer la qualité du ciment.
- En outre, la valorisation de ce déchet industriel polluant nous permet de contribuer à l'amélioration de l'équilibre écologique et de la protection de l'environnement.

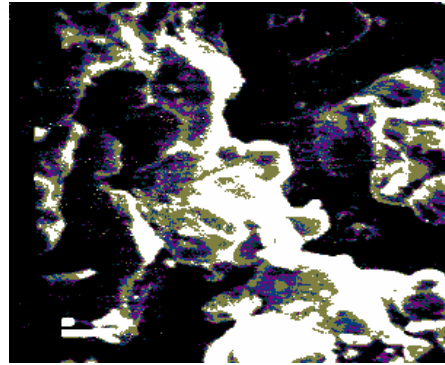
International Symposium on Cement and Concrete, Beijing-China, 1985), pp.16-19.

[6] «Cement, Mineral Commodity profiles.», MCP-26, Bureau of Mines, U.S. Department of Interior, (1978)

Institut Für steine und Erden der Tu Clausthal, Clausthal -Zellerfeld, (1990), pp.132-136.



Vue au microscope optique (40 fois)



Vue au microscope électronique à balayage (800 fois)

Figure 6 : Morphologie du clinker à 4% de phosphogypse cuit à 1200°C (CPG4-1200).

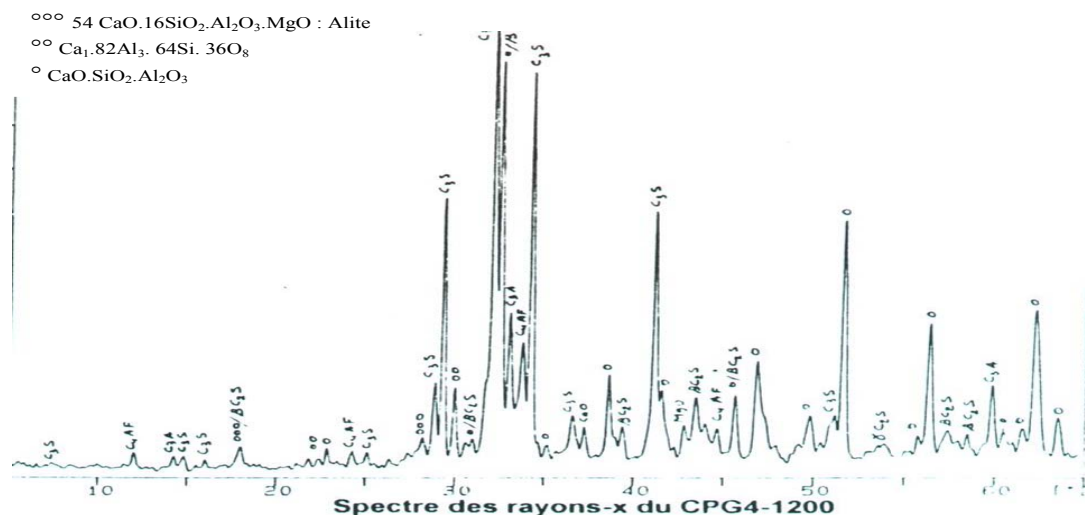


Figure 7 : Analyse structurale du clinker à 4% de phosphogypse cuit à 1200°C (CPG4-1200).

REFERENCES

- [1] Meric J., «Formation d'un clinker consommant peu d'énergie.», 8e congrès international de la chimie des ciments, Rio de Janeiro, Brasil, (1986), pp. 121-122.
- [2] Older I. und Abdul-Moula S., «Effect of mineralizers on the burning of portland cement clinker.»,
- [3] Older I. und Abdul-Moula S., «Möglichkeiten der trennung de reinzelnem Bestandteile des portland zements durch selektive Lösungsmittel.», Zement-Kalk-gips, N°32 (1992), pp.504-507.
- [4] Older I. und Dörr H., «Tricalcium silicate formation by solid state reactions», A.m. ceram. Soc. Bull, N° 56 (1987), pp. 1086 – 1089.
- [5] Ruilum Y., Bolin W. and Weidong M., «A new investigation on mineralization mechanism of fluorspart.»,

ABRIVIATIONS

- M.C : Mélange cru
 MCZ: Mélange cru de Zahana.
 MCB: Mélange cru de béni-saf.
 MCC: Mélange cru de Chlef.
 CPG4-1200: Clinker à 4% de phosphogypse cuit à 1200°C.
 CDV 4-1300 : Clinker à 4% de déchet de verre cuit à 1300°C.
 CLA 4-1350: Clinker à 4% de laitier cuit à 1350°C.
 CCV 4-1350: Clinker à 4% cendres volantes cuit à 1350°C.
 CPh4-1350: Clinker à 4% de phosphate cuit à 1350°C.
 CPOZ4-1350: Clinker à 4% de pouzzolane cuit à 1500°C.
 CNaF 1-1300: Clinker à 1% de NaF cuit à 1300°C.
 CCaF21-1300: Clinker à 1% de CaF2 cuit à 1300°C.
 CCaSO41-1350: Clinker à 1% de CaSO4 cuit à 1350°C.
 CZnO1-1300: Clinker à 1% de ZnO cuit à 1300°C.
 CZ 0-1400: Clinker de Zahana sans minéralisateur cuit à 1400°C.

OBTENTION D'UN CLINKER PORTLAND CONSOMMANT PEU D'ENERGIE

COZ 1470: Clinker ordinaire de Zahana sans minéralisateur cuit à 1470°C.

C3S: 3CaOSiO_2 ; C2S: 2CaOSiO_2 ; C3A: $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$; C4AF: $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$.

DP: début de prise; FP: fin de prise; E: Expansion

RC, RF: résistances à la compression et à la flexion; J: jour.