

Chapitre VI : Résultats Expérimentaux et Interprétation

VI -1 Introduction :

Dans ce chapitre ; on présente les différents résultats expérimentaux des essais effectués sur les différents composants du ciment anhydre, les mortiers, suivi par des discussions et interprétations basés sur la littérature.

VI -2 Facteurs de Qualité du Clinker :

VI -2-1 Broyabilité du clinker :

D'après le Tableau (6-1), le clinker de la cimenterie Lafarge holicim M'sila de Hamam Dalaâ a une broyabilité plus aisée (plus le coefficient est grand plus la broyabilité demande moins d'énergie) ce qui favorise l'obtention d'une granulométrie plus fine avec un rendement énergétique favorable.

Nature du clinker	Clinker de Lafarge holicim de M'sila H/Dalaâ
Coefficient de broyabilité	4,11

Tableau 6-1 Coefficient de Broyabilité.

VI-2-2 Qualité du clinker :

D'après le Tableau (6-2), on constate que le coefficient de saturation en chaux vaut 0.963 (proche de 1) donc presque toute la chaux est consommée et par conséquent on obtient un ciment qui ne présente aucun risque d'expansion. Donc notre clinker est de bonne qualité.

Nature du clinker	Clinker de Lafarge holicim de M'sila H/Dalaâ
Coefficient de qualité	0,963

Tableau 6-2 Coefficient de saturation en chaux du clinker.

VI-3 Influence du Taux d'ajout laitier Sur le Poids Spécifique du Ciment :

Les résultats du Tableau (6-3 ; 6-4) et la Figure (6-1) présentent l'effet de l'addition d'ajout laitier sur le poids spécifique du ciment ou densité du ciment.

- **Broyage séparée:**

Type des ciments	CPA 0%	5% Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Taux d'ajout laitier (%)	0	5	10	20	25	30	35
Poids spécifique (t/m ³)	3.17	3.16	3.14	3,12	3,08	3,06	3.02

Tableau 6-3 Poids spécifique des ciments préparés de broyage séparé.

- **Broyage simultané :**

Type des ciments	CPA 0%	5% Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Taux d'ajout laitier (%)	0	5	10	20	25	30	35
Poids spécifique (t/m ³)	3.16	3.15	3.13	3,11	3,07	3,05	3

Tableau 6-4 Poids spécifique des ciments préparés de broyage simultané.

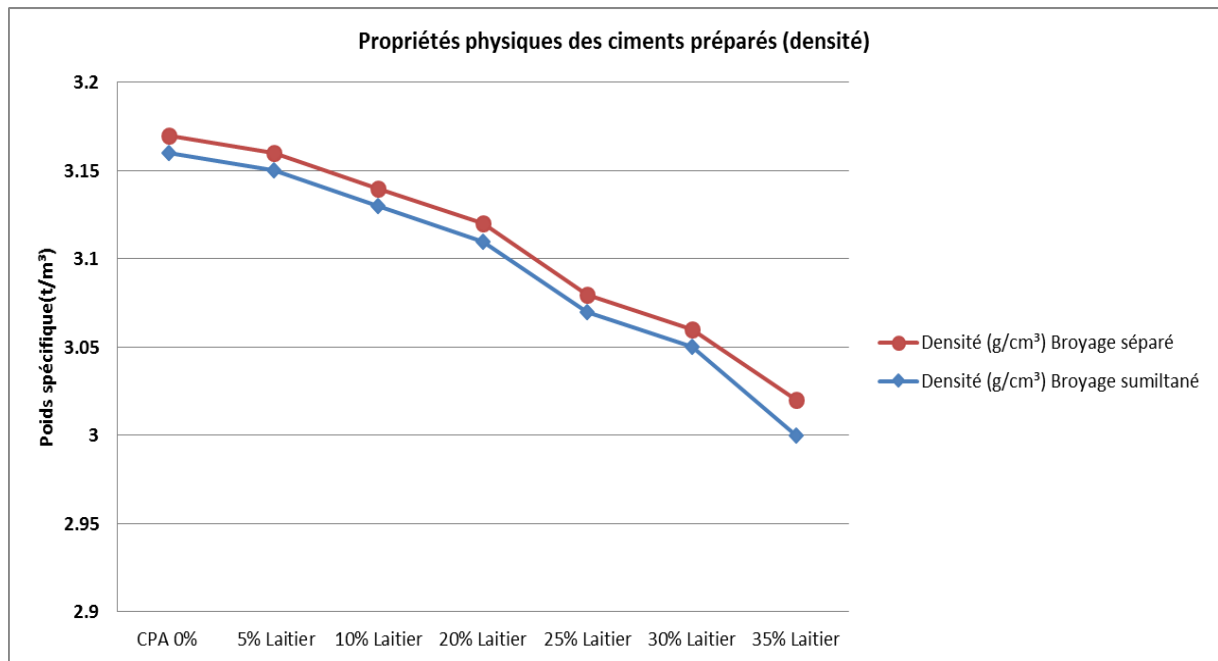


Figure 6-1 Variation du poids spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier), (Broyage séparée et simultané).

Remarque :

A la lumière des essais réalisés, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une réduction du poids spécifique avec l'augmentation du pourcentage d'ajout laitier dans le ciment.
- augmentation des temps (début et fin) de prise Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout laitier incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique de ciment.

VI -4 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Surface Spécifique du Ciment :

Les résultats des Tableaux (6-5 ; 6-6) et la Figure (6-2) présentent l'effet de l'addition d'ajout laitier sur la surface spécifique du ciment.

• **Broyage séparé:**

Type de ciment	CPA 0%	CPA+ 5%L	CPA+10 %L	CPA+ 20%L	CPA+ 25%L	CPA+ 30%L	CPA+ 35%L
Taux d'ajout laitier (%)	0	5	10	20	25	30	35
SSB (cm2/g)	3620	3690	3720	3790	3800	3880	3920

Tableau 6-5 Surface spécifique des ciments préparés par broyage séparée.

• **Broyage simultané :**

Type de ciment	CPA 0%	CPA+ 5%L	CPA+10 %L	CPA+ 20%L	CPA+ 25%L	CPA+ 30%L	CPA+ 35%L
Taux d'ajout laitier (%)	0	05	10	20	25	30	35
SSB (cm ² /g)	3600	3660	3700	3760	3780	3860	3890

Tableau 6-6 Surface spécifique des ciments préparés par broyage simultané.

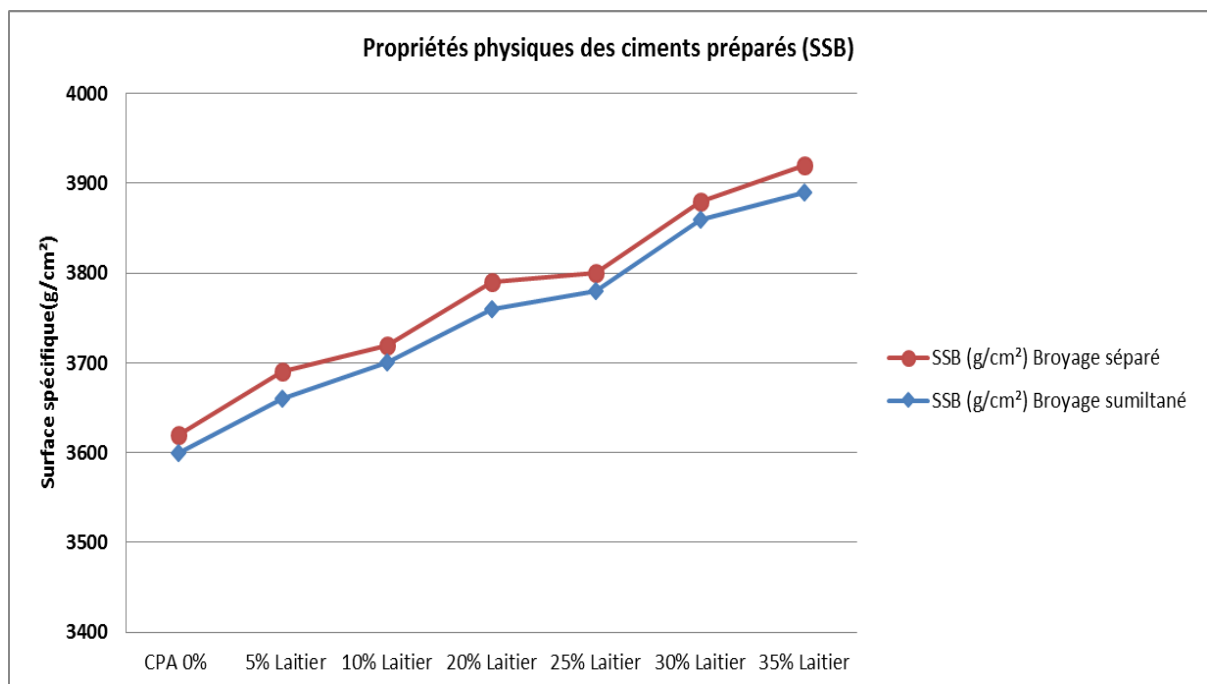


Figure 6-2 Variation de la surface spécifique de ciment en fonction de taux d'ajout (laitier), (Broyage séparée et simultané).

Remarque :

Les Conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une augmentation de la surface spécifique avec l'augmentation du pourcentage d'ajout laitier dans le ciment.
- Selon les résultats obtenus, voir tableau (6-5 ; 6-6), on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout laitier incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le surface spécifique (Blaine) de ciment.

VI -5 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Pâte de Ciment :**VI -5-1 Influence du taux d'ajout laitier Sur la Consistance Normale :**

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableaux 6-7 ; 6-8 et Figures 6-3) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier) sur la consistance normale de ciment.

La demande de l'eau des pâtes de ciments préparées avec les différents pourcentages d'ajout laitier : (0%, 5%, 10%,20%,25%,30% et 35%) est mesurée en utilisant l'essai d'aiguille de Vicat manuel. L'influence de la quantité de l'ajout (laitier) sur la pâte de ciment est exprimée par les variations du rapport de demande en eau pour obtenir une consistance normale.

- **Le rapport E/C pour le broyage séparé:**

Type de ciment	CPA 0%	5%Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Consistance Normale E/C (%)	26.2	25.5	24,8	24,2	23.8	23.4	23.1

Tableau 6-7 Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale), (Broyage séparé).

- **Le rapport E/C pour le broyage simultané :**

Type de ciment	CPA 0%	5%Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Consistance Normale E/C (%)	26.5	25.8	25	24,5	24.1	23.8	23.5

Tableau 6-8 Propriétés physiques des ciments préparés (consistance normale), (Broyage simultané).

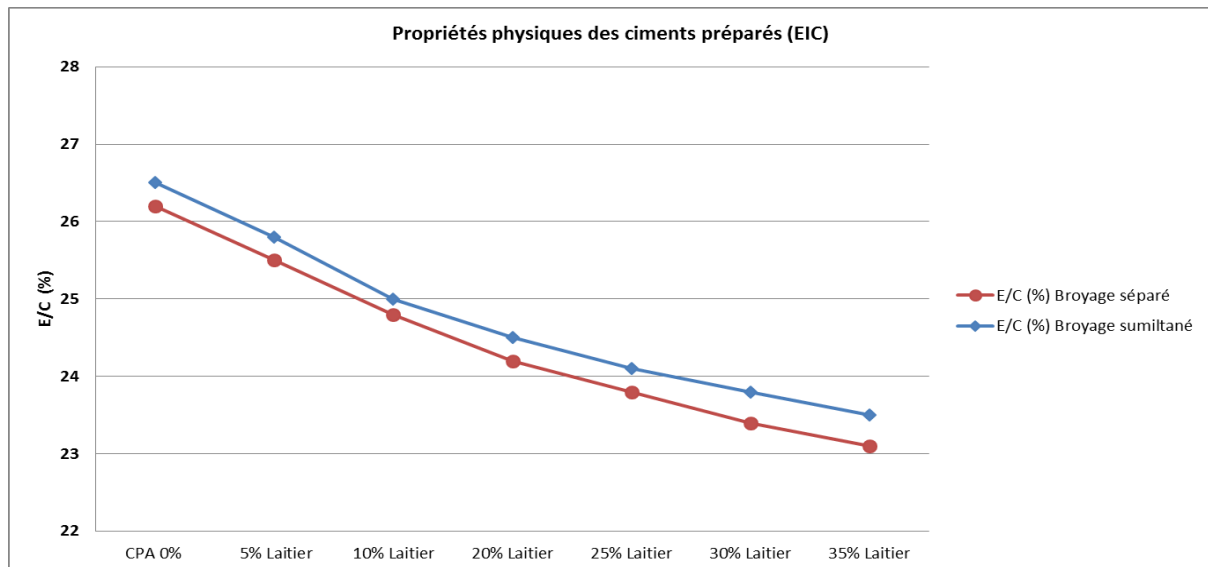


Figure 6-3 Variation du Rapport E/C (Consistance normale) en fonction du taux d'ajout (laitier) (Broyage séparée et simultané).

Remarque :

Selon les résultats obtenus (Figures 6-3), on note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (laitier) incorporé dans le ciment a l'effet suivant :

- on remarque pour E/C pour ciment CPA est plus élevé **26.02** par rapport autre ciment à base d'ajout.
- cela est attribué à la teneur de C_3A élevée un élément très actives vus le temps d'absorption de l'eau est un dégagement de chaleur d'hydratation plus importante s'est pourquoi le ciment CPA a un rapport E/C élevée.
- Si un remarque le rapport E/C pour le ciment simultané plus important que celle de séparé cela une fonction de la teneur de C_3A .

VI -5-2 Influence du Taux d'ajout laitier sur le Temps de Prise :

Les résultats expérimentaux obtenus (Tableaux 6-9,6-10 et Figures 6-4) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier) sur le temps de prise de la pâte de ciment.

L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat automatique.

• **Broyage séparé :**

Type de ciment	CPA 0%	5% Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Début de prise (min)	130	140	160	165	175	190	195
Fin de prise (min)	190	225	240	255	265	280	295

Tableau 6-9 Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise). Par broyage séparé.

- **Broyage simultané :**

Type de ciment	CPA 0%	5% Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Début de prise (min)	140	145	165	175	185	195	205
Fin de prise (min)	200	230	255	260	275	295	305

Tableau 6-10 Propriétés physiques des ciments préparés (Temps de Prise) Par broyage simultané.

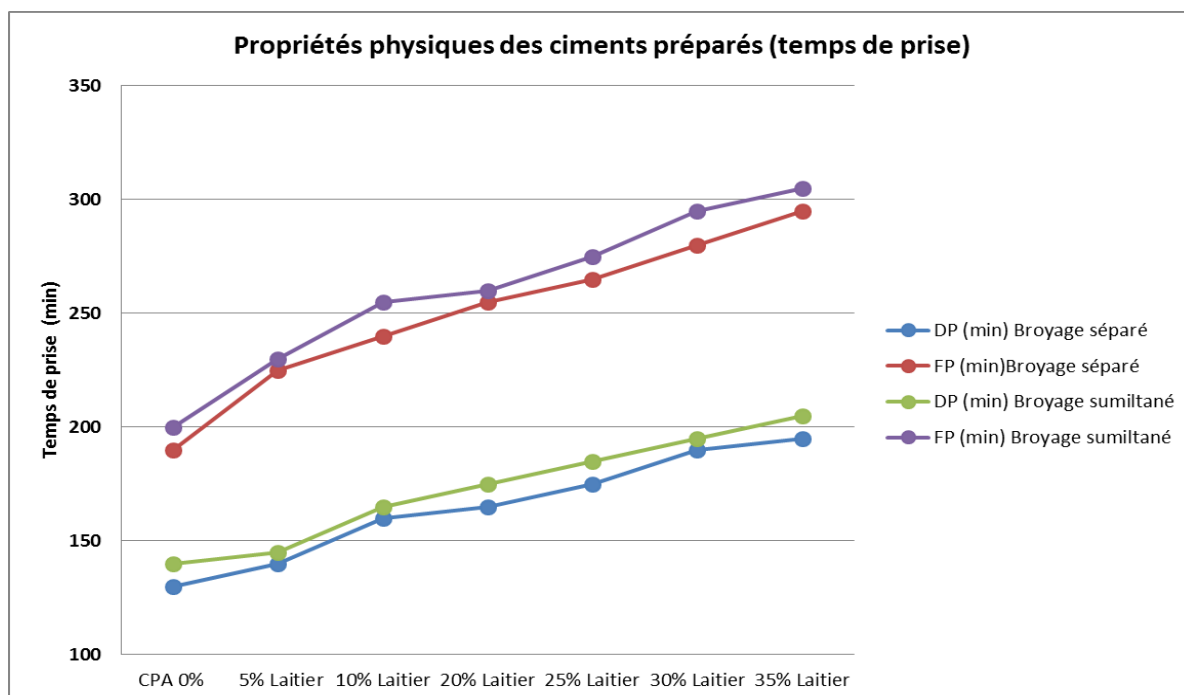


Figure 6-4 Variation des Temps de prises en fonction de taux d'ajout (laitier), (Broyage séparé et simultané).

Remarque :

D'après la courbe on remarque pour les ciments séparé un début de prise et fin de prise moins en comparons à celle de ciment simultané et en explique sa l'influence de la C_3A l'élément responsable de dégagement de chaleur.

VI -5-3 Influence du Taux d'ajout laitier Sur la Stabilité du Ciment :

Cette augmentation de l'expansion peut être expliquée par la présence d'impuretés ainsi que d'autres éléments tels que le MgO qui sont préjudiciables au ciment et qui donnent généralement une expansion plus élevée.

- **Broyage séparé :**

Type de ciment	CPA0%	5% Laitier	10% Laitier	20% Laitier	25% Laitier	30% Laitier	35% Laitier
Expansion à chaud (mm)	0.5	1	1	1	1	1	1.5

Tableau 6-11 Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier) par broyage séparé.

- **Broyage simultané :**

Type de ciment	CPA0%	CPA+ 5%L	CPA+10 %L	CPA+ 20%L	CPA+ 25%L	CPA+ 30%L	CPA+ 35%L
Expansion à chaud (mm)	1	1	1.5	1.5	1	1	1.5

Tableau 6-12 Propriétés physiques des ciments préparés (Expansion de Chatelier) par broyage simultané.

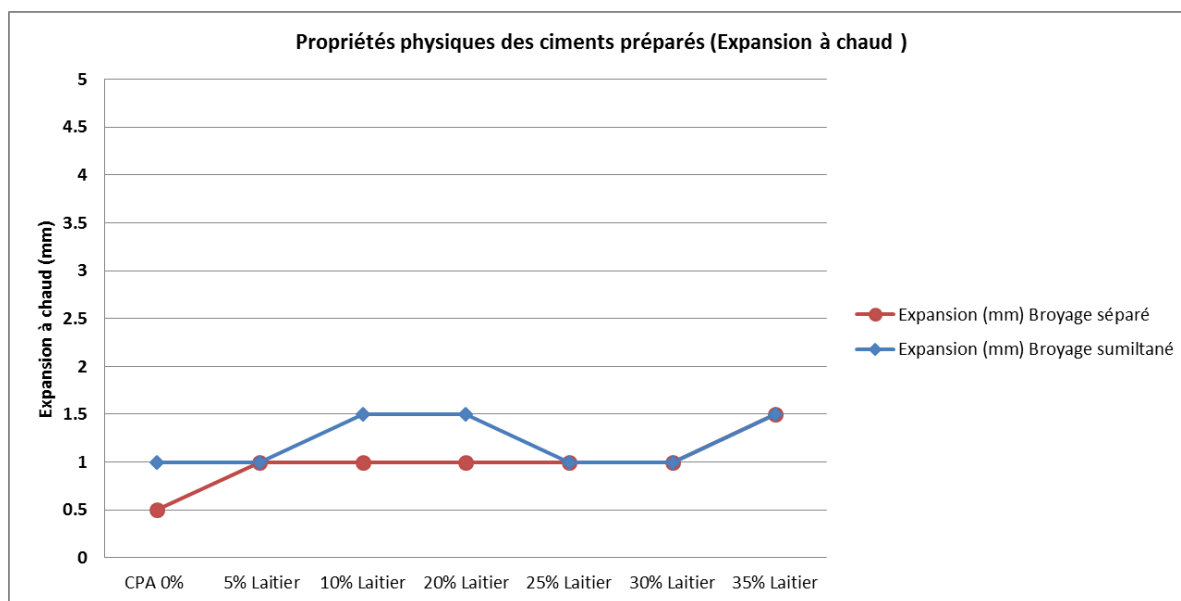


Figure 6-5 Effet du taux d'ajout laitier sur l'expansion du ciment (Broyage séparée et simultané).

Remarque :

D'après le résultat de l'expansion de Chatelier le ciment préparé respecte la norme EN 196-3 (<10 mm) .

VI -6 Influence du Taux d'ajout laitier Sur Le Mortier à base de sable Normalisé :

VI -6-1 Résistance à la Compression :

La Figure (6-6 ; 6-7 ; 6-8) montrent le développement des performances des mortiers contenant différents pourcentages du taux d'ajout (laitier) par substitution (remplacement partiel du ciment par le laitier) dans le ciment (effet chimique) en fonction des différents âges.

- **Broyage séparé:**

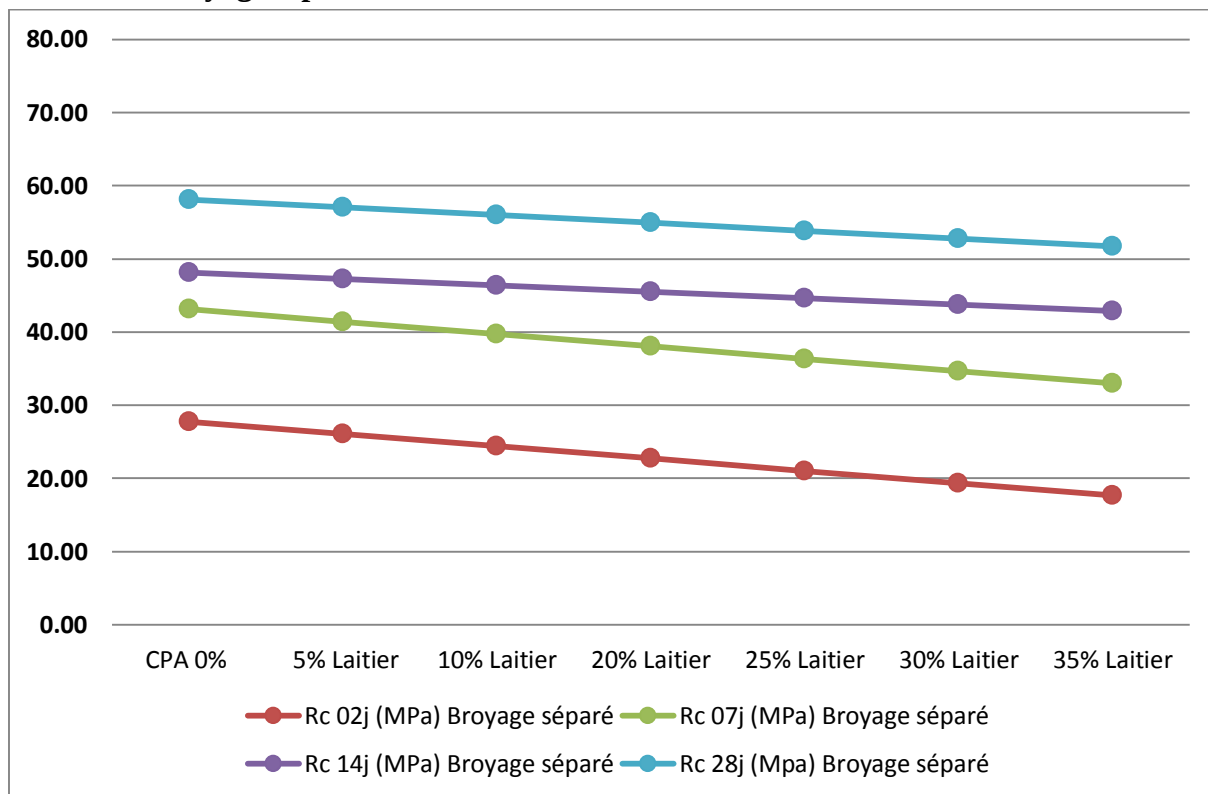


Figure 6-6 Effet du Taux d'ajout laitier sur la Résistance à la Compression (broyage séparé).

- **Broyage simultané :**

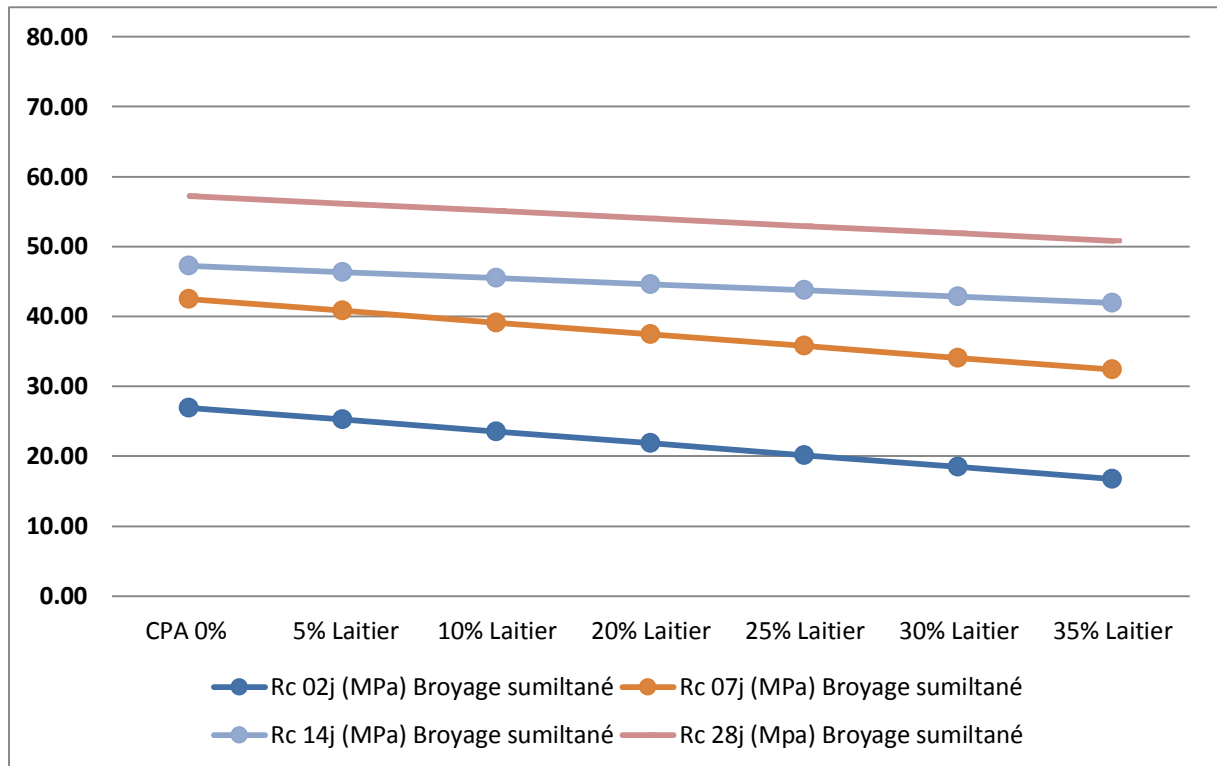


Figure 6-7 Effet du Taux d'ajout laitier sur la Résistance à la Compression (broyage simultané).

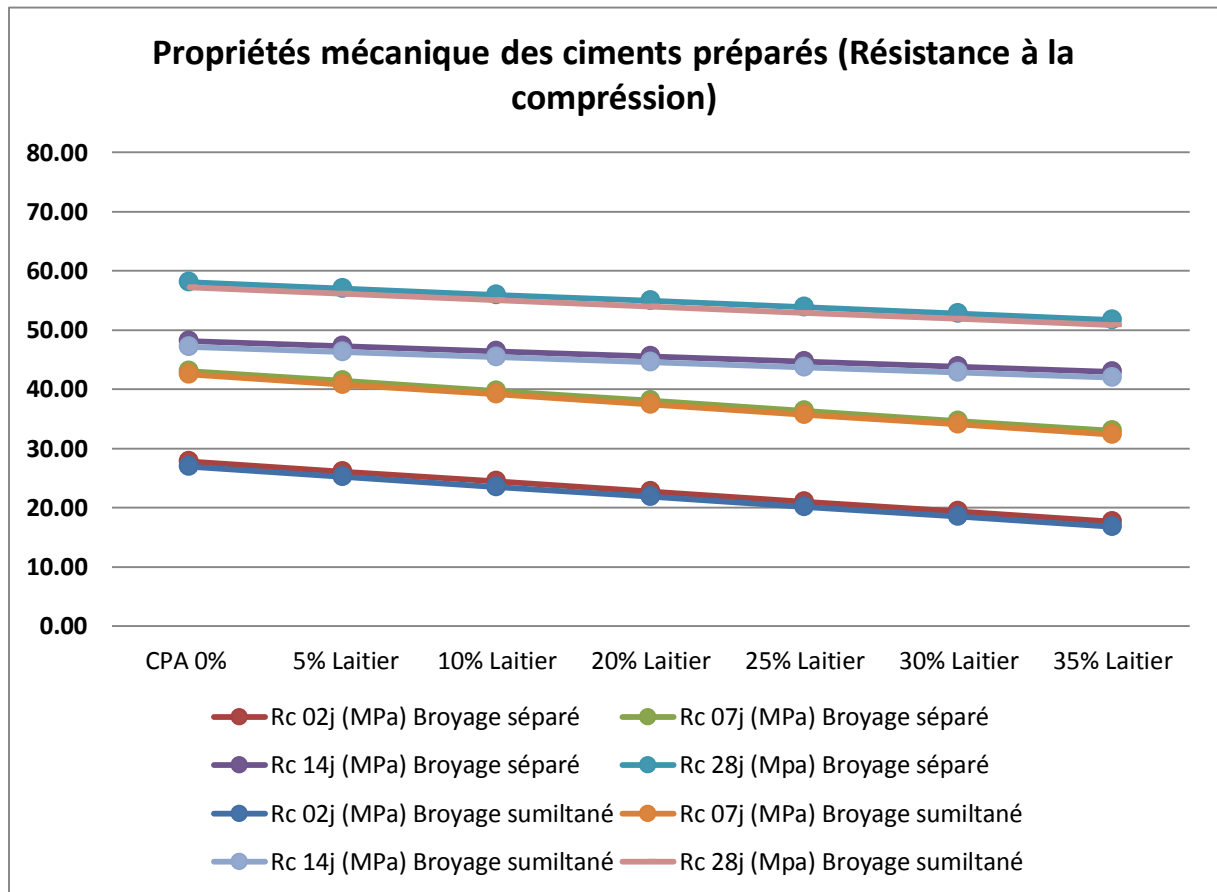


Figure 6-8 Une comparaison du mélange séparé et simultané dans la résistance à la compression.

Remarque :

D'après la figure on remarque pour tout que les courbes ont la même tendance. La résistance augmente avec l'ajout.

D'après la figure on constate que le résultat de la résistance mécanique pour les mélanges séparé et simultané est presque compatible vu la composition chimique proche.

D'après la figure on ne constate pas de différence entre les mélanges séparé et simultané des ciments.

VI -7 Effet du Taux d'ajout laitier (effet chimique) Sur Le Retrait :

- Broyage séparé :

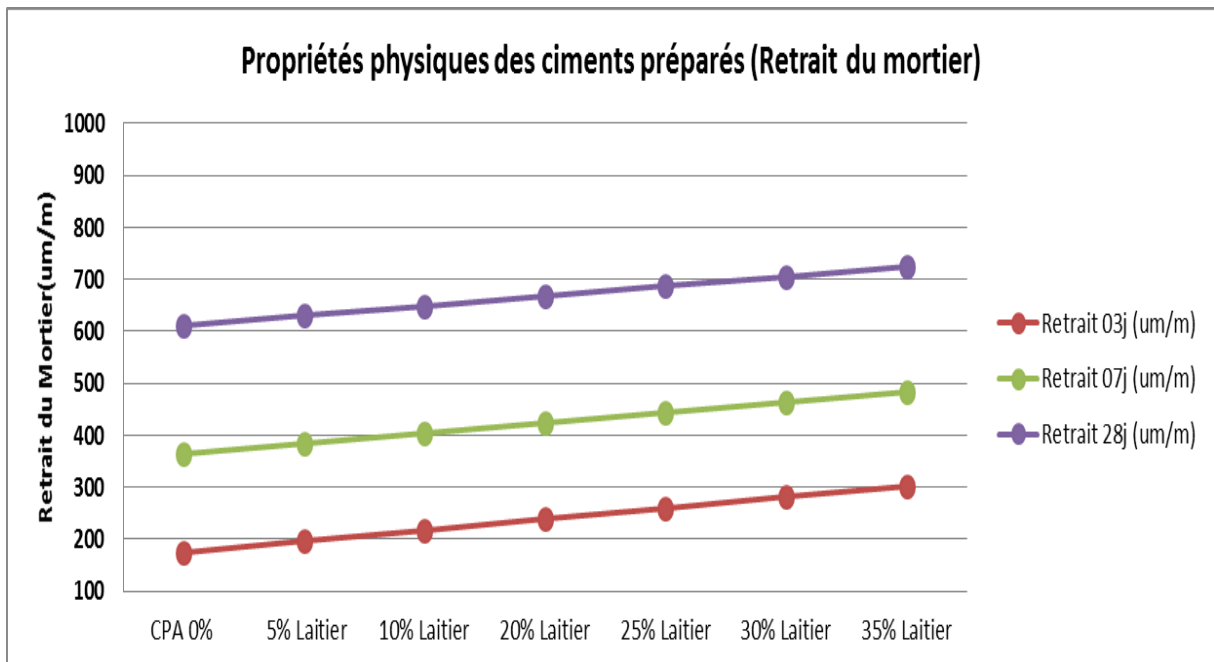


Figure 6-9 Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout laitier)broyage séparé(.

- Broyage simultané :

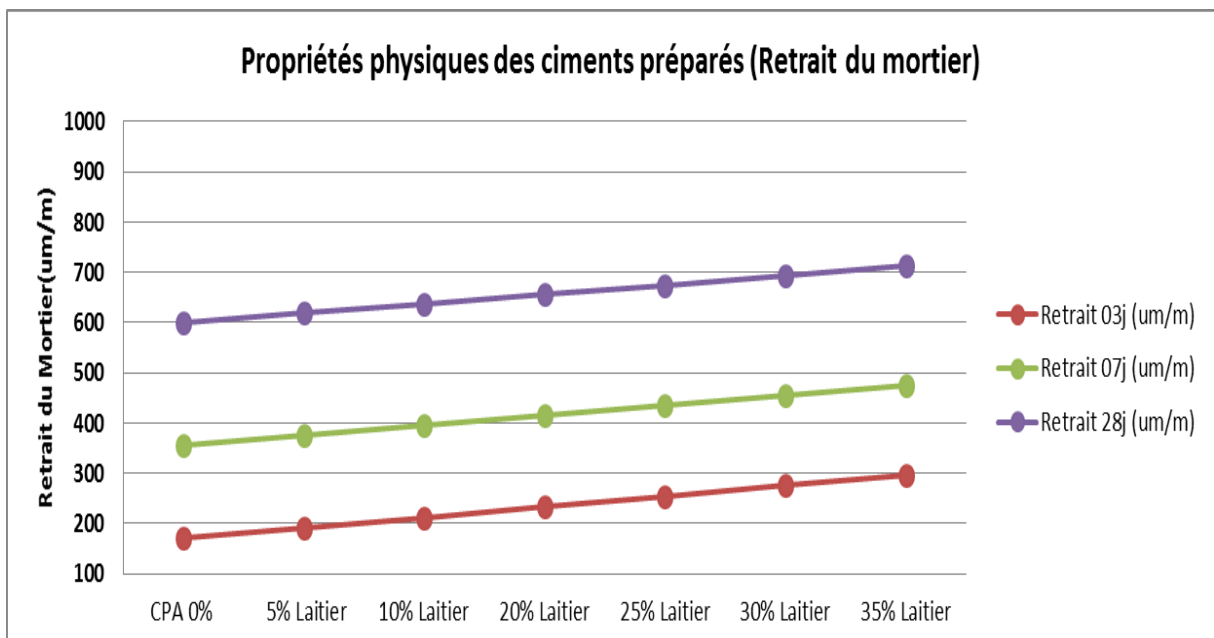


Figure 6-10 Evolution du Retrait du mortier en fonction du taux d'ajout laitier (broyage simultané).

Remarque :

Le Retrait augmente avec l'âge du mortier, ceci est dû à l'hydratation du ciment qui génère un fin réseau des pores capillaires des amas d'hydrates formés et à la dessiccation.

Les Retraits des ciments avec ajouts de laitier sont supérieurs à ceux du ciment Portland (sans ajout).

Ceci peut s'expliquer par la diminution du nombre et du diamètre des pores de la pâte du ciment hydraté, ainsi qu'à la formation d'un C-S-H secondaire à l'homogénéité est broyage idéal.

VI -8 Effet du Taux d'ajout laitier (effet chimique) Sur Le Gonflement :

La variation du gonflement mortier normal en fonction de l'ajout laitier est représentée dans les Figures (6-10 et 6-11).

- **Broyage séparé :**

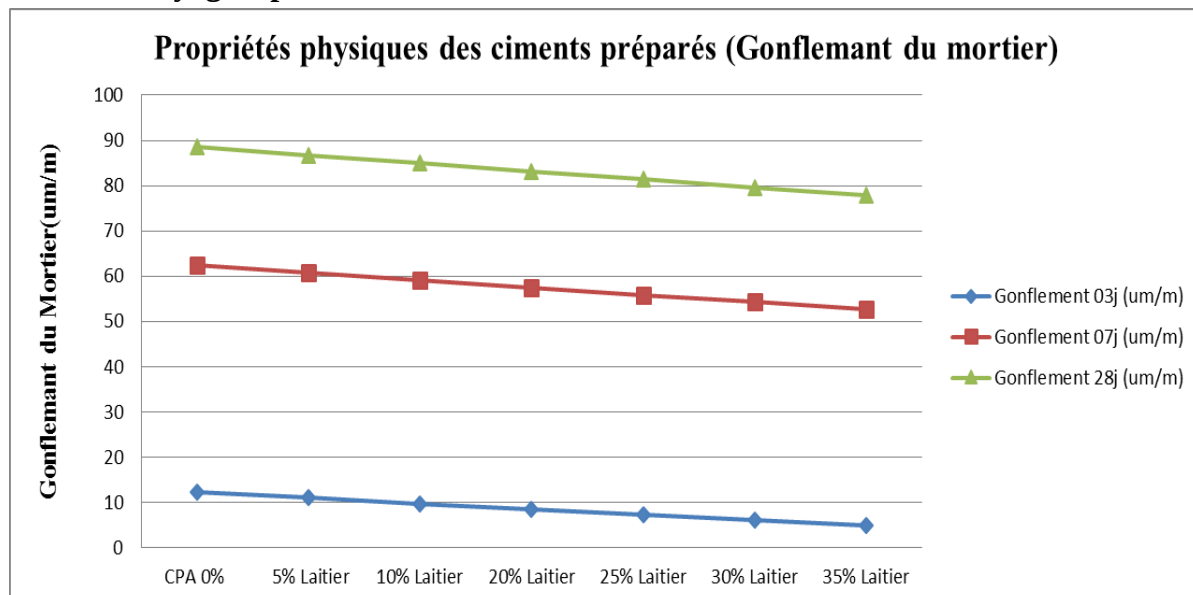


Figure 6-11 Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout laitier (broyage séparé) .

- **Broyage simultané :**

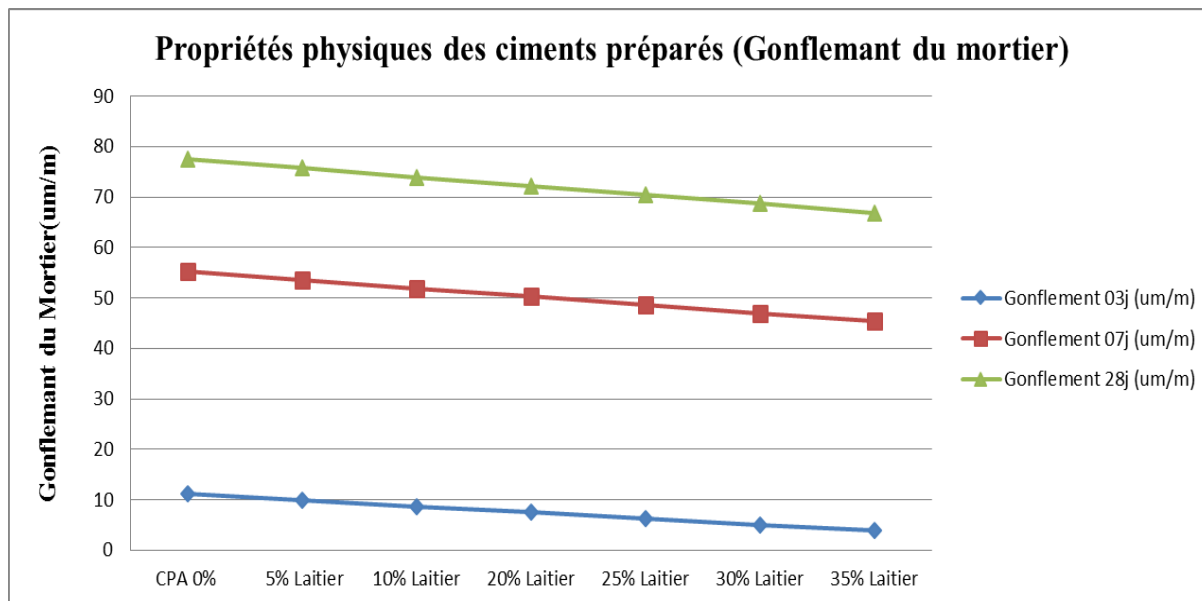


Figure 6-12 Evolution du gonflement du mortier en fonction du taux d'ajout laitier (broyage simultané).

Remarque :

Les Figures (6-11et 6-12) illustre la variation des déformations du gonflement des ciments ; on remarque que la vitesse de gonflement est relativement linéaire entre 3 et 28 jours.

- on remarque le gonflement plus important pour le ciment CPA par rapport CPA avec l'ajout et en peu explique par le fait que l'activité de clinker influence sur l'hydratation de ciment (activité plus rapide).

VI -9 Effet du Taux d'ajout Laitier (effet chimique) Sur La Chaleur d'hydratation :

Les résultats expérimentaux obtenus les Figures (6-13,6-14) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier) sur la chaleur d'hydratation des échantillons de mortier normalise.

L'essai consiste à suivre le dégagement de chaleur de mortier en utilisant l'appareil de langavant (semi-adiabatique).

- **Broyage séparé :**

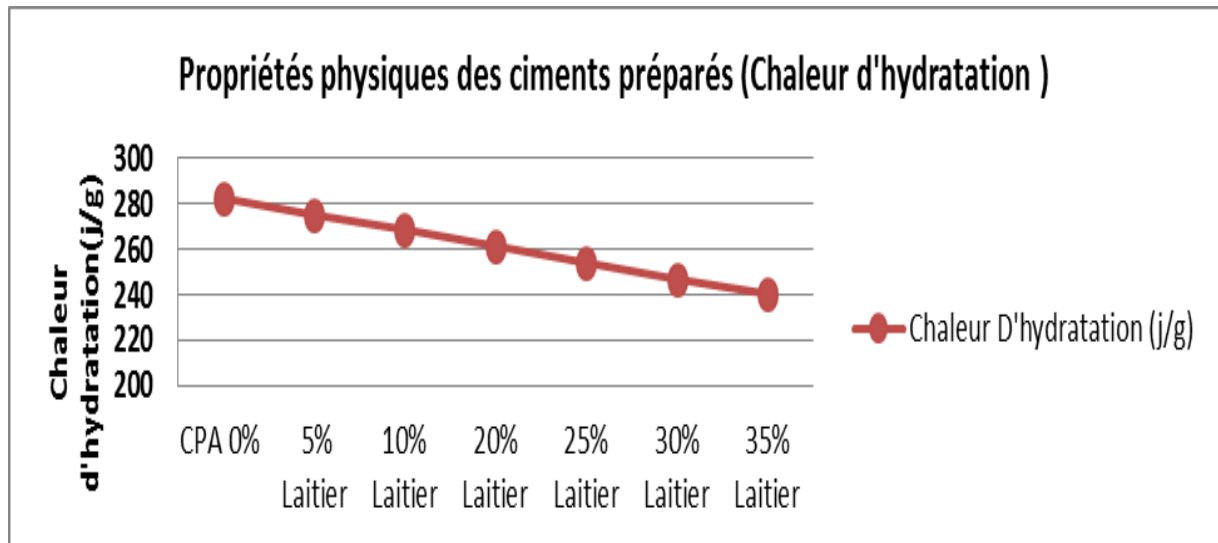


Figure 6-13 Effet du taux d'ajout laitier sur la chaleur d'hydratation(broyage séparé).

- **Broyage simultané :**

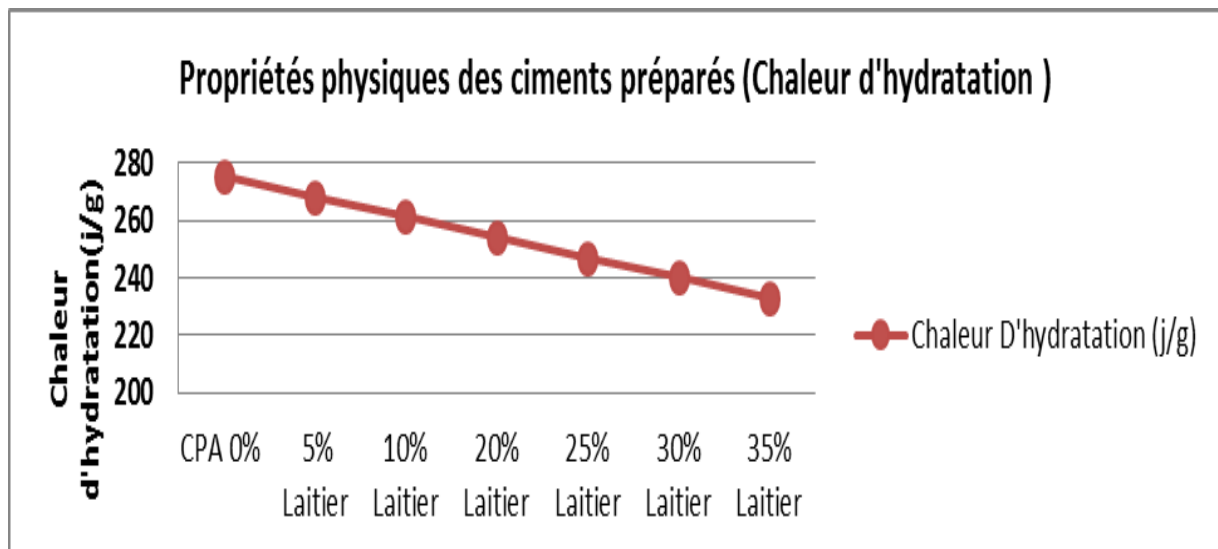


Figure 6-14 Effet du taux d'ajout laitier sur la chaleur d'hydratation(broyage simultané).

Remarque :

On note que l'augmentation du pourcentage de l'ajout (laitier) incorporé dans le ciment a un effet :

- diminue le taux de dégagement de chaleur d'hydratation.
- il y pas grand différence entre ciment séparé et simultané moins influencée par la méthode de broyage séparé par rapport simultané.

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier :

- la nature et taux d'ajout utilisé dans le ciment dans notre cas le laitier

- la nature minéralogique du clinker : plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- la température extérieure

VI -9-1 Effet du Chaleur d'hydratation Sur le Temps de Prise :

VI -9-1-1 Début de prise :

- Broyage séparé :

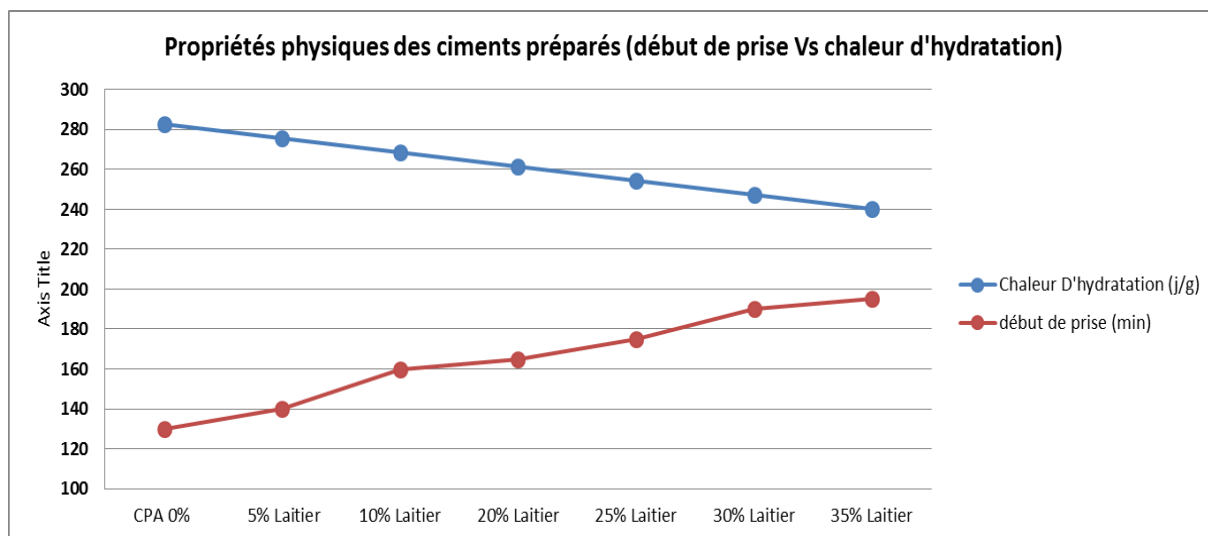


Figure 6-15 Effet chaleur d'hydratation en fonction du début de prise.

- Broyage simultané :

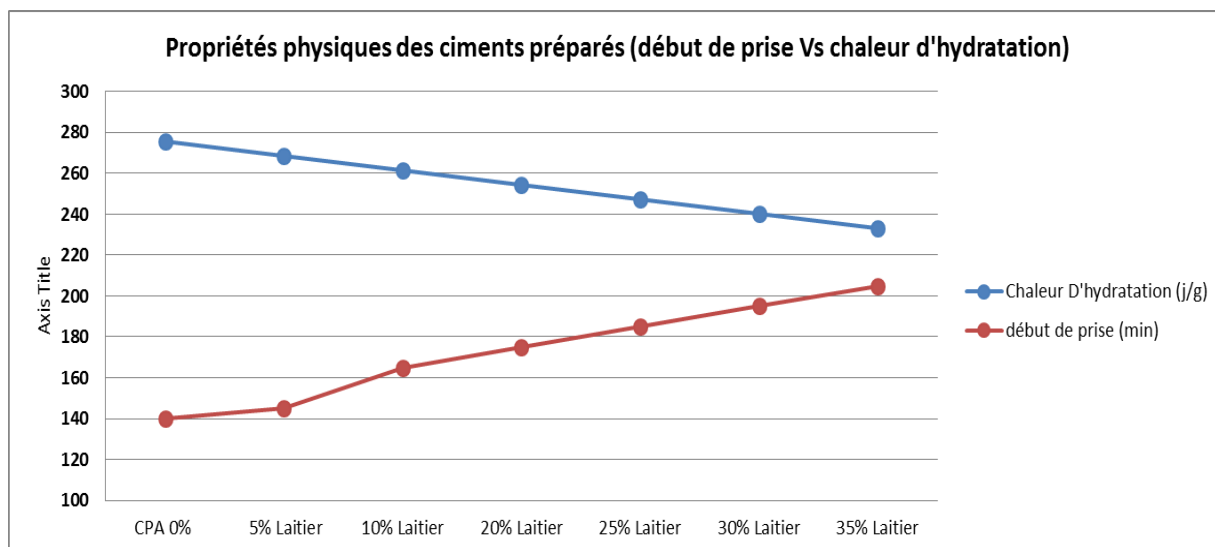


Figure 6-16 Effet chaleur d'hydratation en fonction du début de prise.

Remarque:

Il y a une corrélation entre la chaleur d'hydratation et le début de prise sa vous dire un début de prise minimale automatique

- La chaleur d'hydratation important.

VI-9-1-2 fin de prise :

- **Broyage séparé :**

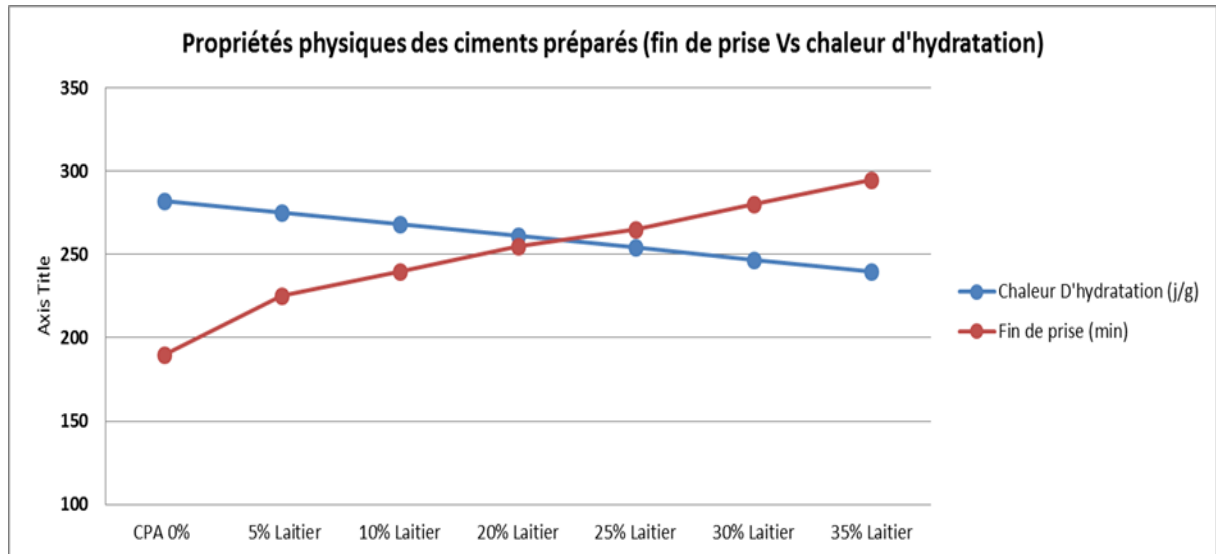


Figure 6-17 Effet chaleur d'hydratation en fonction de la fin de prise.

- **Broyage simultané :**

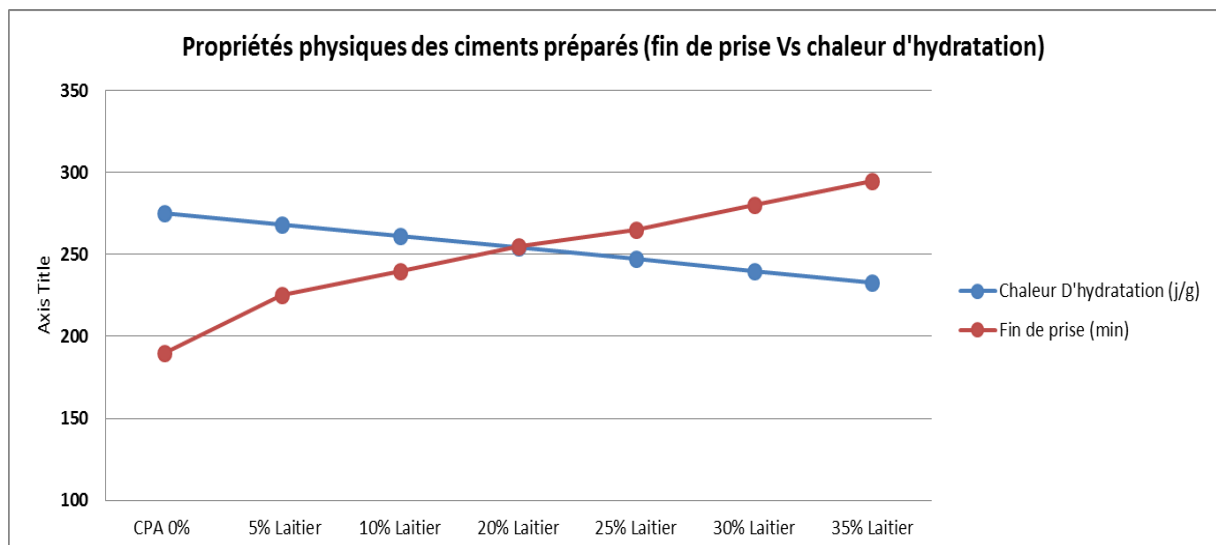


Figure 6-18 Effet chaleur d'hydratation en fonction de la fin de prise.

Remarque :

On Remarque le même constat confiée pour la chaleur d'hydratation avec fin de prise alors pour les ciments de CPA jusqu'à un teneur de 20% laitier

On a remarque aussi que la chaleur d'hydratation augment avec l'augmentation de la fin de prise par contre pour la teneur de ciment 25% à 30% remarque l'inverse diminution de la chaleur d'hydratation et une augmentation de la fin de prise.

VI-10 Analyse Granulométrique :**VI -10-1 Granulométrie à Méthode Alpine :**

Les résultats expérimentaux obtenus (Figures 6-19,6-20) présentent l'effet du taux d'ajout (laitier) sur l'analyse granulométrique à 32 μm et 45 μm .

- **Broyage séparé :**

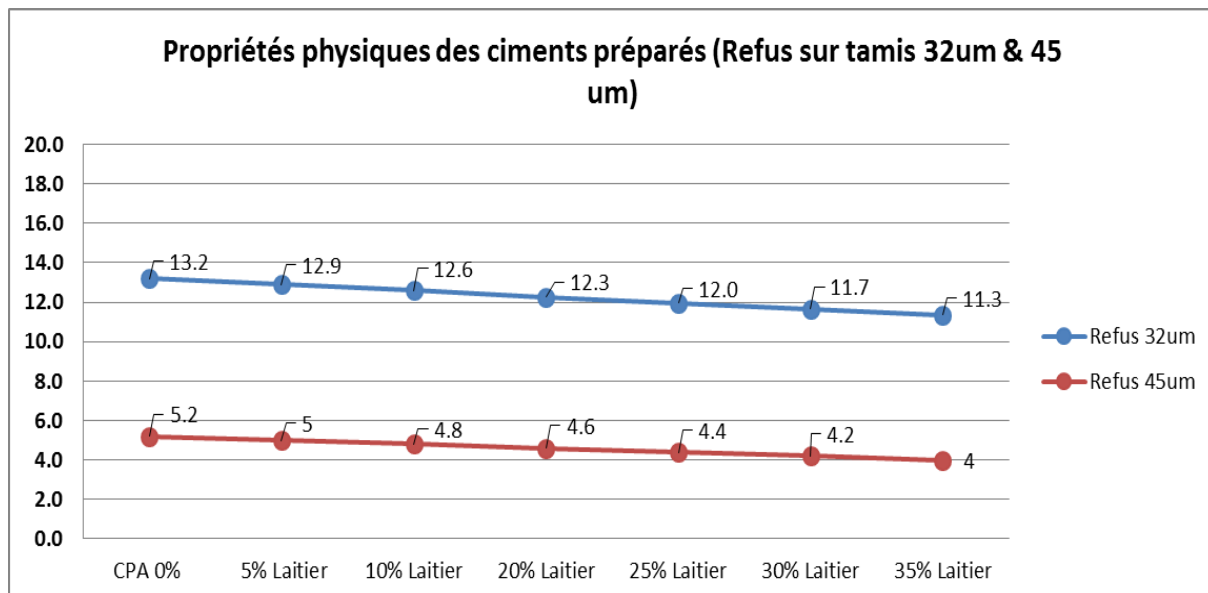


Figure 6-19 Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE) par broyage séparé.

- **Broyage simultané :**

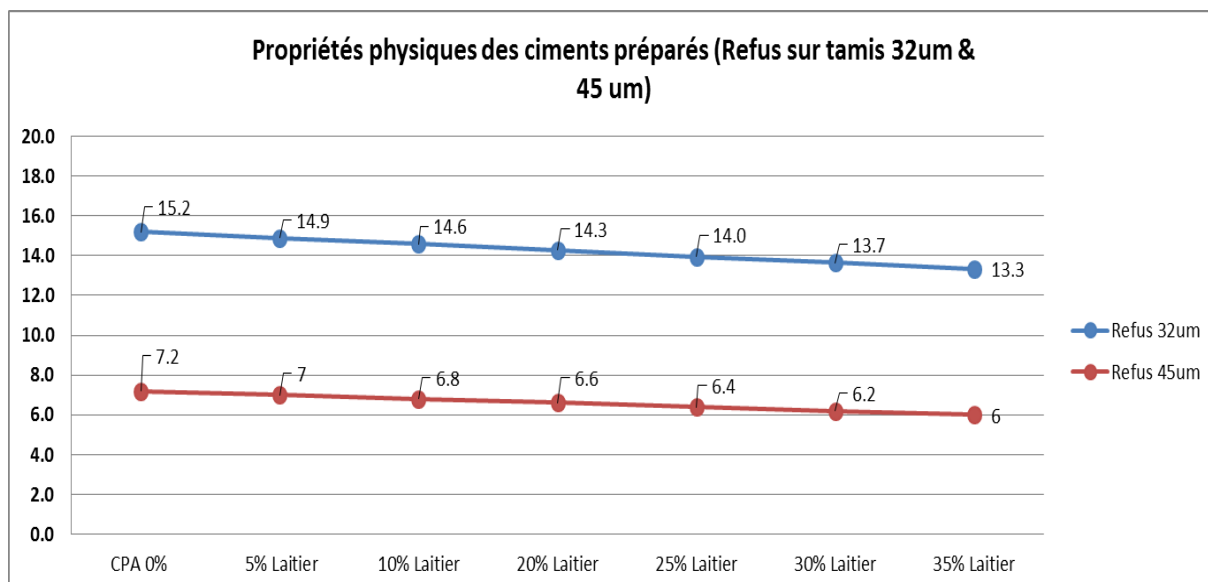


Figure 6-20 Analyse granulométriques de ciment préparé (ALPINE) par broyage simultané.

Remarque :

L'augmentation de taux d'ajout laitier dans les ciments préparé diminue la granulométrie de ciment.

Le ciment 35 % de laitier séparé 3920 automatiquement un refus moins pour le deux tamis 32 μm et 45 μm .

VI -10-2 La Relation entre la surface spécifique et les analyses granulométriques :

Selon la Figures (6-21 ; 6-22), on note que la relation de surface spécifique et l'analyse granulométrique est une relation inverse.

L'augmentation du taux d'ajout laitier augmente la surface spécifique et diminue la granulométrie de ciment.

- **Broyage séparé :**

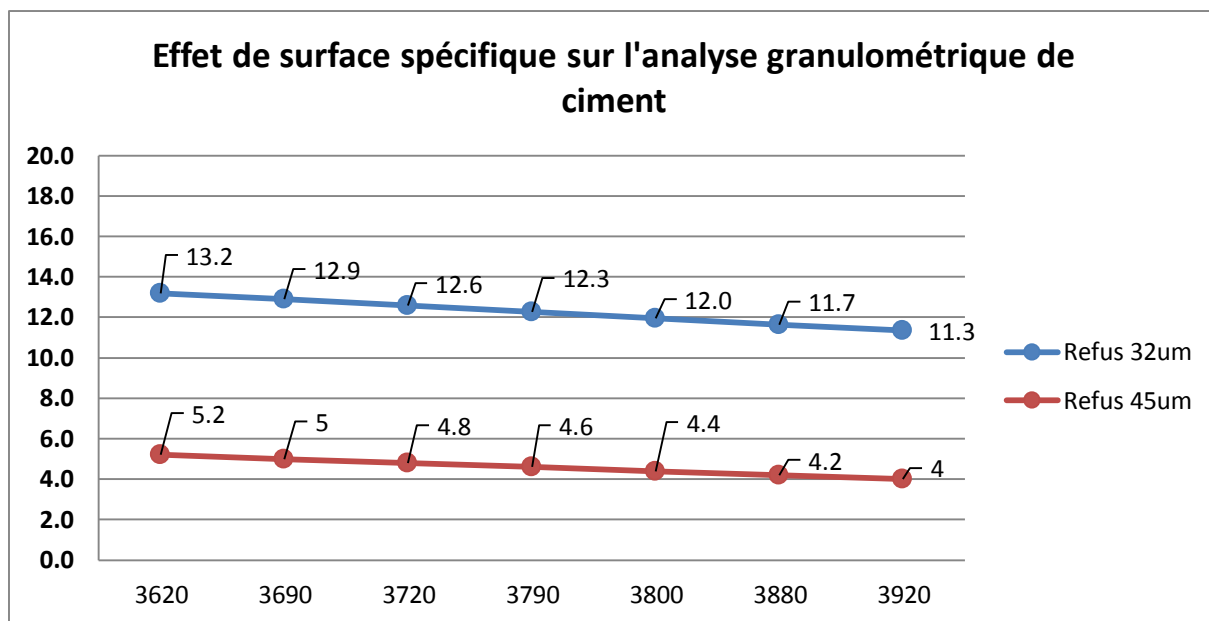


Figure 6-21 Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE) broyage séparé.

- Broyage simultané :

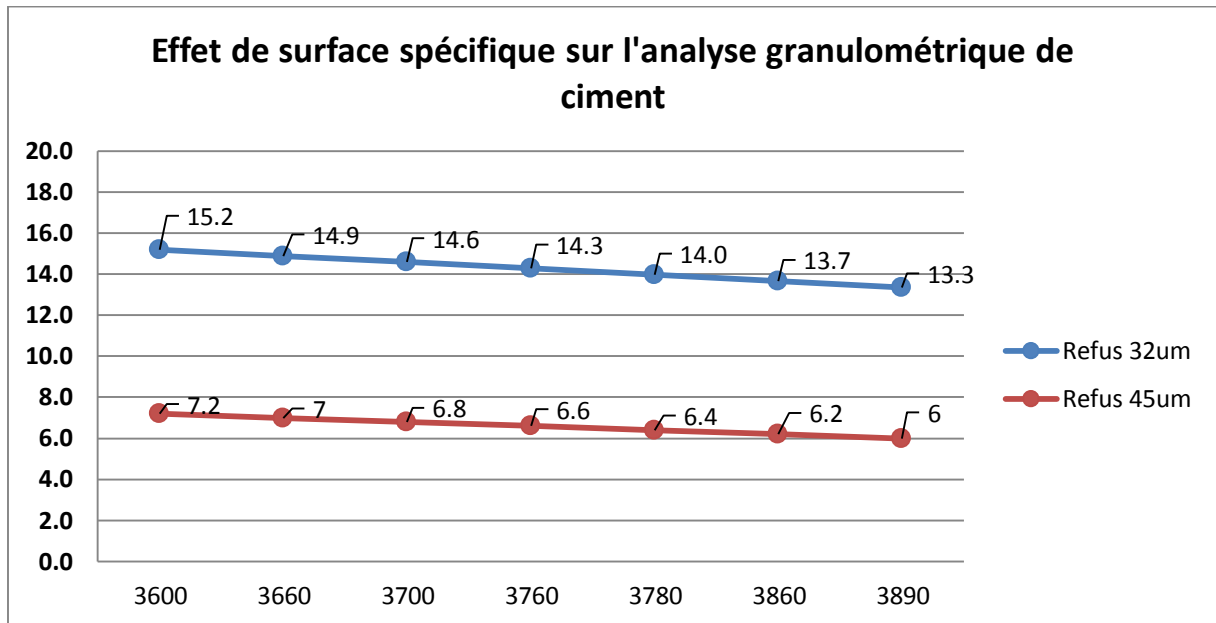


Figure 6-22 Effet de surface spécifique sur l'analyse granulométriques de ciment (ALPINE) Broyage simultané.

Remarque:

D'après les courbes :

Les résultats sont logiques, le refus dépend la finesse SSB de ciment

-si SSB est supérieur le refus est diminué.