

Chapitre III

Matières premières, formulation des Ciments – Mortiers - et Mesures Expérimentales

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières, la méthode de formulation des ciments et mortier et description des essais utilisés.

III-1 Matières Premières utilisé

Les Principaux composants des ciments élaborés sont :

- Argile cuite (déchet de brique).
- Clinker (usine Lafarge).
- Gypse (biskra).

III-1-1 Argile cuite (déchet de briques)

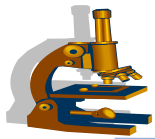
L'argile cuite utilisé dans notre étude expérimentale comme ajout est un déchet de brique. Le ciment a été substitué partiellement à différents pourcentages (0%,5% , 10%, 15%,20%) par rapport au poids massique de clinker par un ajout de argile cuite (Figure 3.1).



Figure 3-1 Déchet de briques.

III-1-1-1 Composition chimique d'argile cuite

La composition chimique est indiquée dans le Tableau (3-1). Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de la cimenterie de Lafarge hammam dalaà.



L'analyse s'effectue sur un échantillon finement broyé , afin de déterminer sa composition chimique.

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CL	Pert.f
Argile Cuite	65.23	14.06	5.15	6.43	1.92	1.91	1.06	0.31	0.054	1.02

Tableau 3-1 Composition chimique d'Argile cuite

III-1-2 Le clinker

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de C₃S.

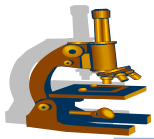
Les matières premières utilisées pour la fabrication du clinker de la cimenterie de Hammam Dalâa et les caractéristiques physiques sont indiquées dans le Tableau (3-2).

Clinker	Clinker de Hammam Dalaa (H/D)
Ingrédient du clinker	Calcaire
	Argile
	Sable de dune (Bousâada)
	Minerai de fer
Densité apparente	1.12

Tableau 3-2 Principaux constituants du cru de clinker.

III-1-2-1 Composition chimique et minéralogique du clinker

Les compositions chimique et minéralogique du clinker utilisé sont présentées dans le Tableaux (3-3).

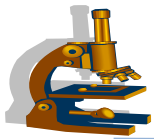


L'analyse chimique a été effectuée au laboratoire de la cimenterie Lafarge (Hammam Dalaâ) (Figure 3.2).

Éléments (%)	Clinker
SiO ₂	21.21
Al ₂ O ₃	4.90
Fe ₂ O ₃	3.17
CaO	67.15
MgO	1.75
SO ₃	1.09
K ₂ O	0,67
Na ₂ O	0,10
Chaux libre	1.37
C ₃ S	68.3
C ₂ S	9.31
C ₃ A	7.63
C ₄ AF	9.64

Tableau 3-3 Composition chimique et minéralogique du clinker.

La composition minéralogique du clinker a été déterminée d'après la formule de BOGUE.



III-1-2-2 L'analyse par diffraction aux rayons X (D.R.X) du clinker

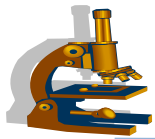
L'analyse par diffraction aux rayons X (D.R.X) des échantillons permet de caractériser la nature des phases minérales cristallisées présentes dans le clinker (usine hammam Dalâa).

Analyses DRX	Éléments (%)	Clinker
	Alite_M3	34,02
	Alite_M1	33,01
	Alite_Sum	67,03
	Fraction_M1	49,29
	Alite_CS	84,76
	Belite_beta	12,61
	Alum_cubic	2,07
	Alum_ortho	0,28
	Alum_Sum	2,35
	Ferrite	15,43
	Lime	1,03
	Portlandite	0,15
	fCaO_XRD	1,14
	Periclase	0,32
	Quartz	0,00
	Arcanite	0,83
	Langbeinite	0,00
	Aphthitalite	0,25
	sticky factor	9,59
	Liq 1340	22,85
	Fcao Relative	1,38
	K2SO4	1,18
	Liq 1450/liq 1340	1,08
	Liq1450	24,78
	C3S	68.3

Tableau 3-4 Composition minéralogique par diffraction aux rayons X (D.R.X) du clinker.



Figure 3-2 Clinker four (Lafarge M'sila).



III-1-3 Le gypse

III-1-3-1 Composition chimique

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a été maintenu constant à 4%. dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment.

Les compositions chimiques du gypse sont données par le tableau (3-5).

Eléments(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F	CL
Gypse de Biskara	9,13	1,95	1,10	28,68	9,57	30,02	0,07	0,00	26,93	0,024

Tableau 3-5 Composition chimique du gypse.

Le rôle principale de gypse :

- Contribue la résistance à 02 jours.
- Régulateur de prise.
- Aide de broyage de ciment.

III-2 Formulation des Ciments

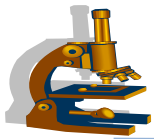
III-2-1 Composition pondérale des différents ciments

Les différents ingrédients (Clinker, Argile cuite et gypse) ont été concassés séparée à une dimension à inférieure à 100um, Puis mélangés soigneusement différentes proportions.

Dans cette étude on a Visé deux finesses 4000 cm^2/g et 4500 cm^2/g sur chaque mélange (Taux d'ajout argile cuite).comme établis de tableau suivant :

Finesse visé (cm^2/g)	Types de ciments	Clinker (%)	Gypse (%)	Argile Cuite (%)
4000 cm^2/g	CEM Témoin CPA	95	5	0
	CEM 01	90	5	5
	CEM 02	85	5	10
	CEM 03	80	5	15
	CEM 04	75	5	20
4500 cm^2/g	CEM Témoin CPA	95	5	0
	CEM 01	90	5	5
	CEM 02	85	5	10
	CEM 03	80	5	15
	CEM 04	75	5	20

Tableau 3-6 Compositions pondérales des dix (10) ciments préparés.



II-2-2 Analyses chimiques des différents ciments préparés

Les résultats de la composition chimique des Cinq (05) ciments préparés sont présentés dans le Tableau (3-7). L'ajout Argile cuite substitué à divers pourcentages (0%, 5%, 10%, 15%, 20%).

Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout argile cuite dans le ciment par la méthode de substitution (remplacement partiel du clinker par argile cuite) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques du ciment confectionné avec l'addition minérale et le comportement mécanique du mortier.

Les propriétés physico-chimiques du ciment à l'état anhydre et l'état hydraté (composition chimique, temps de broyage, poids spécifique, finesse, distribution des particules, consistance des pâtes de ciment et temps de prise), ainsi que les caractéristiques des mortiers préparés à leurs bases, telles que, le retrait, le gonflement, le comportement mécanique (résistances mécaniques à la compression et à la flexion).

L'incorporation des additions argile cuite dans le clinker à différents pourcentages : (0%, 5%, 10%, 15%, 20%), augmente le pourcentage des oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , SO_3) et diminue le taux d'oxyde (CaO).

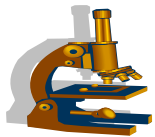
Eléments (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	CL	P.F
CEM Témoin CPA	20.06	4.84	3.4	60	1.6	2.52	0.64	0.11	0.014	0.78
CEM (5%)	23.27	5.49	3.87	59.91	1.63	2.55	0.69	0.11	0.025	1.05
CEM (10%)	25.59	5.95	4.25	59.07	1.63	2.68	0.73	0.11	0.03	1.07
CEM (15 %)	28.25	6.49	4.77	58.11	1.61	2.75	0.77	0.11	0.035	1.01
CEM (20 %)	31.24	7.1	5.47	57.27	1.58	2.78	0.81	0.11	0.037	0.81

Tableau 3-7 Composition chimique des ciments préparés.

La composition chimique est un facteur déterminant de la résistance des ciments aux agents agressifs.

On voit que l'ourcentage en teneur d'anhydride sulfurique (SO_3) est inférieur à 4%.

Ceci est conforme à la norme NF EN 197-1.



II-2-3 Analyses chimiques des différents ciments préparés par diffraction aux rayons X (D.R.X) :

Les types des ciments étudiés par DRX					
Les phases minéralogiques	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%
Alite_Sum	58,3	55,21	54,86	51,25	50,26
Belite_beta	17,23	16,32	15,63	15,10	14,23
Alum_cubic	2,36	2,56	2,39	2,45	2,47
Alum_ortho	0,07	0,16	0,25	0,35	0,1
Alum_Sum	2,43	2,73	2,63	2,79	2,57
Ferrite	13,17	12,2	12,45	11,09	11,23
Lime	0,89	0,73	0,56	0,56	0,61
Portlandite	0,47	0,63	0,39	0,53	0,43
fCaO_XRD	1,24	1,21	0,86	0,96	0,93
Periclase	0,31	0,27	0,16	0,4	0,23
Quartz	0	4,42	5,06	9,01	11,34
Arcanite	0,63	0,57	0,47	0,35	0,53
Langbeinite	0,24	0,27	0,4	0,29	0,38
Aphthitalite	0,08	0,09	0,04	0	0,1
Gypsum	4,17	4,27	4,49	5,26	4,91
Hemi-hydrate	0,02	0,19	0,3	0,58	0,25
Anhydrite	0	0,09	0,18	0,25	0,38
Calcite	0,39	0,39	0,72	0,12	0,19
Dolomite	0,4	0,34	0,37	1,12	1,09
Gypsum_XRD	5	5.04	5.01	5.03	4.98

Tableau 3-8 Composition minéralogiques des ciments préparés.

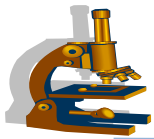


Figure 3-3 DRX BRUKER D4 ENDEAVOR (Lafarge laboratoire)

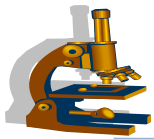
III-3 Composition des mortiers normalisés

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

- 1350 g sable normalisé (Norme EN 196-1).
- 450 g du ciment.
- 225 g l'eau de gâchage (L'eau utilisée pour la confection des mortiers est une eau distillé préparé au laboratoire de la cimenterie (Lafarge M'sila)).



Figure 3-4 Distillateur (Lafarge laboratoire)



III-4 Mesures expérimentales

III-4-1 Essai sur ciment anhydre

III-4-1-1 Masse volumique absolue

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue des Dix (10) types de ciments utilisés dans notre étude.

La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chatelier". Les résultats sont présentés dans le Tableau (3-9).

Conduite de l'essai

- Peser $M=64$ g de ciment .
- Introduire le benzène ou kérosène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit V_0 .
- Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) .
- Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- Introduire la poudre de ciment dans le Densimètre.
- Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre. Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit V_1 .

- Calcul de la masse volumique absolue par la relation :

$$\gamma_C = M / (V_1 - V_0)$$

Finesse visé (cm^2/g)	Type des Ciments	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%
4000 cm^2/g	Masse volumique (g/cm^3)	3.15	3.11	3.08	3.06	3.00
4500 cm^2/g	Masse volumique (g/cm^3)	3.15	3.12	3.07	3.05	2.98

Tableau 3-9 Masse volumique absolue des ciments.

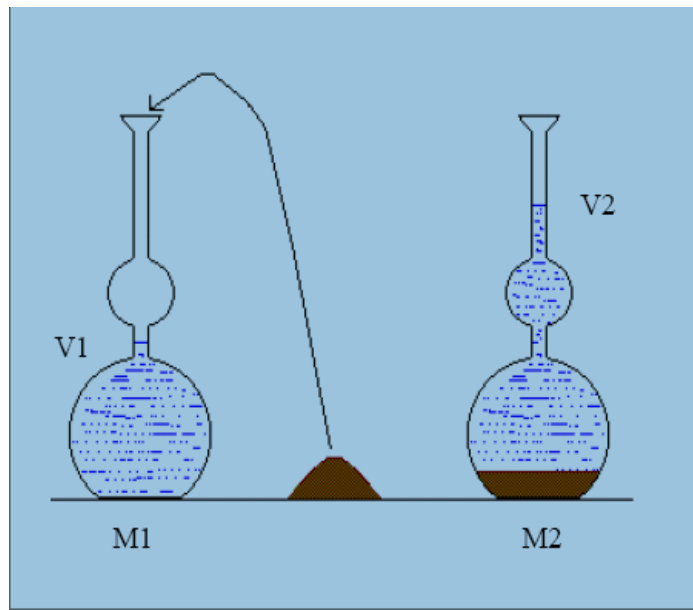
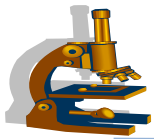


Figure 3-5 Flasque Le Chatelier.

III-4-1-2 Mesure de la finesse du ciment (Norme NF P 15-442 -EN-196-6)

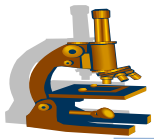
Principe de l'essai

Elle consiste à mesurer le temps mis par une quantité fixée d'air pour traverser un lit de ciment compacté à une dimension et une porosité spécifiées. (Figure 3-6). La surface massique est proportionnelle au temps mis pour traverser la couche de ciment.

Conduite de l'essai

- Peser une quantité de ciment pour obtenir un lit de ciment de porosité $e = 0.500$.
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston .
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre .
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat. Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.
- Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSB = \frac{K}{\rho} \frac{\sqrt[3]{e}}{(1-e)} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{(0,1 \eta)}} (cm^2/g)$$



Avec :

k : constante de l'appareil ($K = 2.177$ selon appareil lafarge) .

ρ : Masse volumique du ciment en g/cm^3 .

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise.

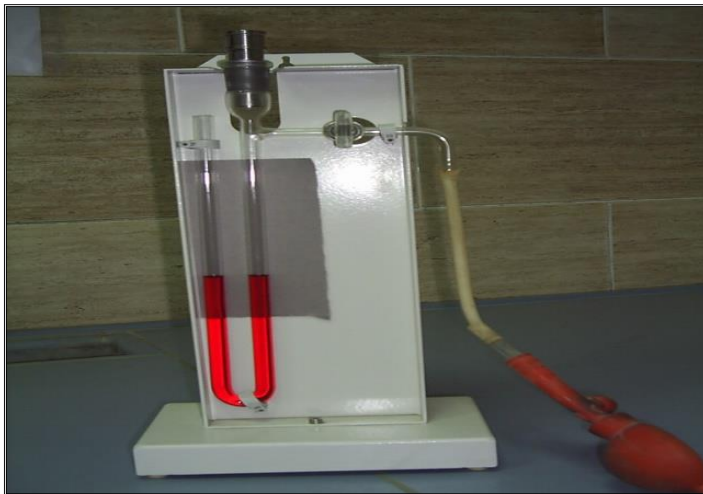
t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre de ciment en seconde.

m : est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine.

$$m = \rho \cdot v \cdot e$$

v = 1.824 volume de la cellule.

e = porosité du ciment dans la cellule (porosité du lit d'échantillon préparée. Pour les ciments type I & II $e = 0,500 + 0,005$).



-Densimètre manuel-



-Densimètre automatique-

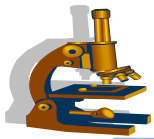
Figure 3-6 Le Densimètre de Le Chatelier.

Finesse visé (cm^2/g)	Type de ciment	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%
4000 cm^2/g	SSB (cm^2/g)	4000	4040	4060	4080	4090
4500 cm^2/g	SSB (cm^2/g)	4500	4500	4510	4520	4530

Tableau 3-10 SSB de différent ciment préparé.

III-4-1-3 Analyse granulométrique

L'analyse des échantillons des ciments composés a été réalisée au laboratoire de la cimenterie Lafarge (M'sila) à l'aide d'un GRANULOMETRE A LASER DE TYPE MASTERSIZER « S » (Figure 3-7), qui est un kit composé d'éléments suivants :



- Un banc optique (analyseur) comprenant principalement :
 - * Un générateur d'émission (émetteur) : source laser.
 - * Différentes lentilles interchangeables en fonction de la plage étudiée :
 - * Cellules de mesure (voie sèche et voie humide)
 - * Récepteur : ensemble de photodiodes.
 - * Détecteurs (Capteurs).
 - * Carte électronique d'interface.
- Les accessoires de préparation :
 - * Voie sèche (dispersion est assurée par de l'air).
 - * Voie humide (circulation des particules dans un dispersant).
- Le système informatique avec logiciel assurant le traitement des données brutes.
Les statistiques de distribution sont calculées d'après les résultats obtenus en utilisant les dérivés **D [m, n]** :



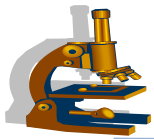
**Figure 3-7 Granulometre à laser de type mastersizer
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

L'aire de surface spécifique (SSA) = Surface totale des particules / poids total
(Il faut fixer la densité de l'échantillon)

- Concentration :

Est la concentration volumique. Elle se calcule selon la loi de Beer – Lambert et s'exprime sous forme de pourcentage.

- Distribution :



Indique le type de distribution qui a été utilisé pour l'analyse.

- Obscuration :

Aide à fixer la concentration de l'échantillon lorsque celui-ci est ajouté au dispersant. C'est une mesure de la quantité de lumière laser perdue, dû à l'introduction de l'échantillon dans le faisceau laser. La plage idéale s'étend de 10% à 30%.

- L'uniformité :

Est la mesure de l'écart absolu à partir de la médiane.

	Finesse visé 4000 (cm ² /g)					Finesse visé 4500 (cm ² /g)				
	Rejet (%)					Rejet (%)				
Taille (µm)	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%
2	90.44	90.45	91.32	90.15	91.12	91.25	91.85	92.55	92.12	92.63
4	82.21	82.65	82.54	82.21	82.42	82.25	82.62	83.21	82.25	83.56
8	70.21	70.25	69.35	67.25	67.45	69.12	68.52	68.25	69.32	70.25
12	60.21	61.12	59.35	59.36	58.35	56.25	55.24	67.24	68.25	57.25
16	52.21	51.25	50.21	49.35	48.25	52.25	53.32	54.02	55.22	54.65
20	46.35	45.25	43.35	41.21	40.25	44.25	45.53	46.62	47.12	47.63
25	39.35	38.25	34.32	33.25	31.21	37.25	36.65	36.12	35.86	35.25
32	30.21	29.52	23.25	22.21	20.25	27.25	26.52	27.85	27.96	28.12
45	13.98	14.12	13.68	13.11	12.58	14.25	13.25	13.12	12.21	13.35
64	7.54	6.85	5.24	3.21	3.11	6.25	7.25	7.1	6.35	5.36
90	2.20	1.58	1.02	.65	.68	0.10	1.35	1.63	1.85	2.12
100	1.21	0,6	0,32	0	0	0	0	0	0	0
SSB (cm ² /g)	4000	4040	4060	4080	4090	4500	4500	4510	4520	4530

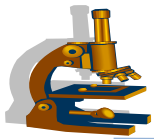
Tableau 3-11 Caractéristiques de la granulométrie a laser des différents ciments.

III-4-1-4 Analyse granulométrique (Méthode alpine)

- Objet

Ce mode opératoire a pour but de décrire le mode d'emploi d'utilisation de la tamiseuse ALPINE référencé M0212.

Nous allons décrire l'appareil et les étapes pour procéder à un tamisage de produits et nous préciserons les consignes à respecter.



- Domaine d'application

Le tamis à air ALPINE est un appareil utilisé pour effectuer des tamisages à secs très fins, sans manipulation de la matière.



Figure 3-8 Tamiseuse Alpine (Laboratoire de Lafarge M'sila) .

- Mode opératoire

- Appareillage

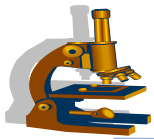
- Description

Le tamis à air ALPINE fonctionne sans aucun mouvement mécanique du tamis ou des autres parties en contact avec la matière, mais simplement par courant d'air.

Il consiste dans l'utilisation contrôlée du courant d'air, pour disperser la matière, entraîner le fin (les fines) à travers les mailles du tamis, nettoyer le tamis.

L'ensemble de l'appareil comprend :

- le tamis Alpine avec manomètre en U.
- le ventilateur.
- le dépoussiéreur (filtre).
- le tambour tamisant.
- un filtre pour recueillir les fines (éventuellement)
- deux tamis : 45 μ m, 90 μ m.



-Détermination du rejet en utilisant un seul tamis

Voici les étapes à suivre :

- faire sécher la matière à tamiser si nécessaire.
- placer le tamis à utiliser sur le bâti.
- peser 10g de matière et vider sur le tamis.
- mettre en place le couvercle en plexiglas.
- brancher l'appareil en tournant vers la droite le bouton de la minuterie jusqu'à la butée fixée d'avance sur 5 min avec le bouton moleté.
- mettre en route l'aspiration.

La minuterie étant branchée, la lance fendue commence à tourner, le ventilateur et l'aspiration de poussière démarrent, le tamisage commence. A travers le plexiglas, on peut observer directement le tamisage.

Si au début de l'opération, une partie de la matière se colle au couvercle, il faut la décoller, aussi longtemps que nécessaire, en donnant toutes les 10 secondes environ quelques coups sur le bouton du couvercle avec le marteau en matière plastique.

Par la suite, la matière grossière soulevée par le courant d'air nettoie elle-même le couvercle.

L'ouverture d'aspiration dans le talon du bâti du tamis doit être absolument libre. On peut tirer le couvercle pour un court instant afin d'écraser des grumeaux éventuels.

Du fait de l'aspiration, il ne se produit pas de perte de matière.

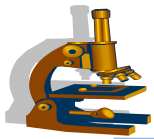
- Lorsque les 5 minutes sont écoulées, l'appareil s'arrête automatiquement.

Couper alors l'aspiration.

- Peser la matière restant sur le tamis.

Soit **P** le poids trouvé en grammes.

Rejet = $P \times 10$ (%). (Voir Tableau 3-12)



	Finesse visé 4000 (g/cm ²)					Finesse visé 4500 (g/cm ²)				
	Rejet (%)					Rejet (%)				
Taille (µm)	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%	CEM Témoin CPA 0%	CEM 01 05%	CEM 02 10%	CEM 03 15%	CEM 04 20%
45 µm	11,2	12,5	12,2	11,8	11,5	10,5	10,9	10,5	10,	9,9
90 µm	1	1	1	0,9	0,9	1,	0,9	0,9	0,9	0,8
SSB (cm ² /g)	4000	4040	4060	4080	4090	4500	4500	4510	4520	4530

Tableau 3-12 Caractéristiques de la granulométrie (Refus 45& 90µm) des différents ciments.

III-4-2 Essais sur ciment hydraté (pâtes de ciment)

III-4-2-1 Essai De Consistance (Norme EN 196-3 2005)

L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau de gâchage optimale qui définit une consistance dite normalisée elle est fonction du rapport E/C.

L'essai a été réalisé avec l'appareil de Vicat selon la norme EN 196-3 (Figures 2-9).

Objectif de l'essai

La consistance de la pâte de ciment est une caractéristique qui évolue au cours du temps.

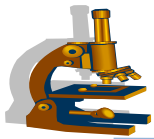
Pour pouvoir apprécier cette évolution qui est fonction de la teneur en ajout (calcaire) dans le ciment et la quantité d'eau de gâchage ; il faut partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

Principe de l'essai

La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une aiguille cylindrique de (Ø =10 mm) sous l'effet d'une charge constante (300g). L'enfoncement est d'autant plus rapide et important que la consistance est plus fluide. (Figure 3-9).

Conduite de l'essai

- Verser la quantité d'eau dans la cuve du malaxeur .La température dans la salle doit être de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative supérieure ou égale à 50%.
- Verser 500 g de ciment au centre de la cuve en un temps compris entre 5 et 10 secondes. La fin du versement correspond au temps 0.
- Mettre immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente pendant 90 s.
- Arrêt du malaxage pendant 30 s, faire le raclage de la pâte.
- Remettre le malaxeur en marche pendant 90s à vitesse lente.



- Introduire la pâte immédiatement dans le moule tronconique de hauteur 40mm et de diamètre 70 et 80 mm posé sur une plaque en verre huilée sans tassement ni vibration excessives.
- Enlever l'excès de la pâte par un mouvement de va et vient avec une truelle maintenue Perpendiculairement à la surface du moule.
- Placer l'ensemble sur la platine de l'appareil de Vicat.
- La sonde de diamètre $\varnothing = 10$ mm est amenée à la surface de la pâte et lâchée sans vitesse initiale. La sonde s'enfonce dans la pâte. Quand elle s'immobilise; ou au plus tard 30s après l'avoir relâchée.
- Mesurer la distance d entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule, cette distance d Caractérise la consistance. Si $d = 6\text{mm} \pm 2$; c'est la consistance normalisée Si d est différente de cette valeur, on refait l'essai avec un nouveau rapport E/C jusqu'à l'obtention de la valeur recherchée.

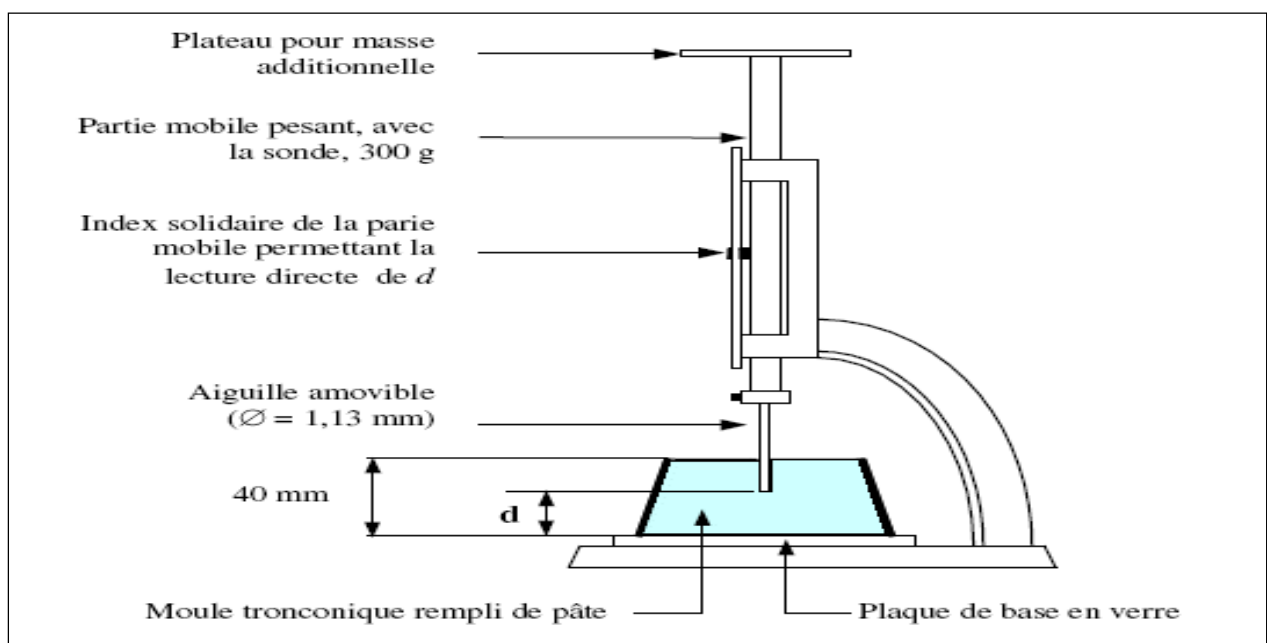


Figure 3-9 Appareil de Vicat manuel.

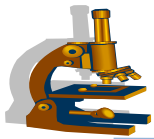
III-4-2-2 Essai de Prise

Objectif de l'essai

Il consiste à déterminer le début et la fin de prise des pâtes pures des ciments étudiées conformément à la norme EN 196-3.

Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de la viscosité de la pâte en utilisant l'appareil de Vicat manuel ou automatique. (Figure 3-10)



Prisomètre (Vicat automatique)



Vicat Manuel

Figure 3-10 L'appareil de Vicat.

Le Vicat manuel équipée d'une aiguille de 1.13mm de diamètre ; sous l'effet d'une charge de 300g l'aiguille s'enfonce à une distance d du fond du moule.

Si $d = 6\text{mm} \pm 3$ On dit que c'est le début de prise, le temps est mesuré à partir du temps 0 du début de malaxage.

Si l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte vaut $d = 0.5\text{mm}$. On dit que c'est la fin de prise, alors la pâte devient un bloc rigide.

Equipement utilisé : Une armoire climatique maintenue à $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et une humidité relative supérieure à 90% et l'appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13mm.

Conduite de l'essai (Norme EN 196-3) : Il s'agit de confectionner une pâte de ciment normalisée comme indiqué au 2-5-2-1.

Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. L'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans vitesse initiale.

Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30s d'attente).

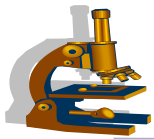
On relève la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille à la plaque de base.

On recommence l'opération à intervalle de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = (6 \pm 3)\text{mm}$ cet instant mesuré à 5 mn près correspond au temps de début de prise.

On continue l'opération en faisant tourner le moule sur l'autre face le temps de fin de prise correspond à l'enfoncement de l'aiguille dans la pâte que de 0.5mm pour la première fois.

III-4-2-3 Essai de stabilité

Objectif de l'essai : L'essai consiste à mesurer l'augmentation de volume provoquée lors de la réaction d'hydratation par la présence de l'oxyde de calcium ou de magnésium contenu dans les ciments étudiés.



Principe de l'essai

L'essai consiste à faire accélérer la réaction d'hydratation par un traitement thermique de la pâte pour pouvoir observer une expansion éventuelle des cinq types de ciment testé.

Equipement nécessaire

Une armoire humide maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et au moins 90% d'humidité relative.

Une bouilloire dans la quelle les éprouvettes sont immergées et la température de l'eau est portée de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ébullition en $3\text{h} \pm 5\text{mn}$ Deux moules en laiton élastique appelés "appareil le Chatelier". Ces moules sont fondus de façon à pouvoir s'ouvrir en cas d'augmentation de volume de la pâte.

Conduite de l'essai

La pâte de consistance normalisée (voir paragraphe 2-5-2-1) est introduite dans les deux moules en laiton. Conservation des moules pendant 24h dans l'armoire humide.

Au bout de ce temps on mesure à 0.5mm près l'écartement **A** des pointes des aiguilles, Le moule est entreposé dans la bouilloire pendant $(3\text{h} \pm 5\text{mn})$ à une température d'ébullition.

Soit **B** l'écartement au bout de ce temps des pointes des aiguilles et soit **C** l'écartement après refroidissement à 20°C La stabilité est caractérisé par la valeur C-A

Stabilité = C-A

Expansion = B-A

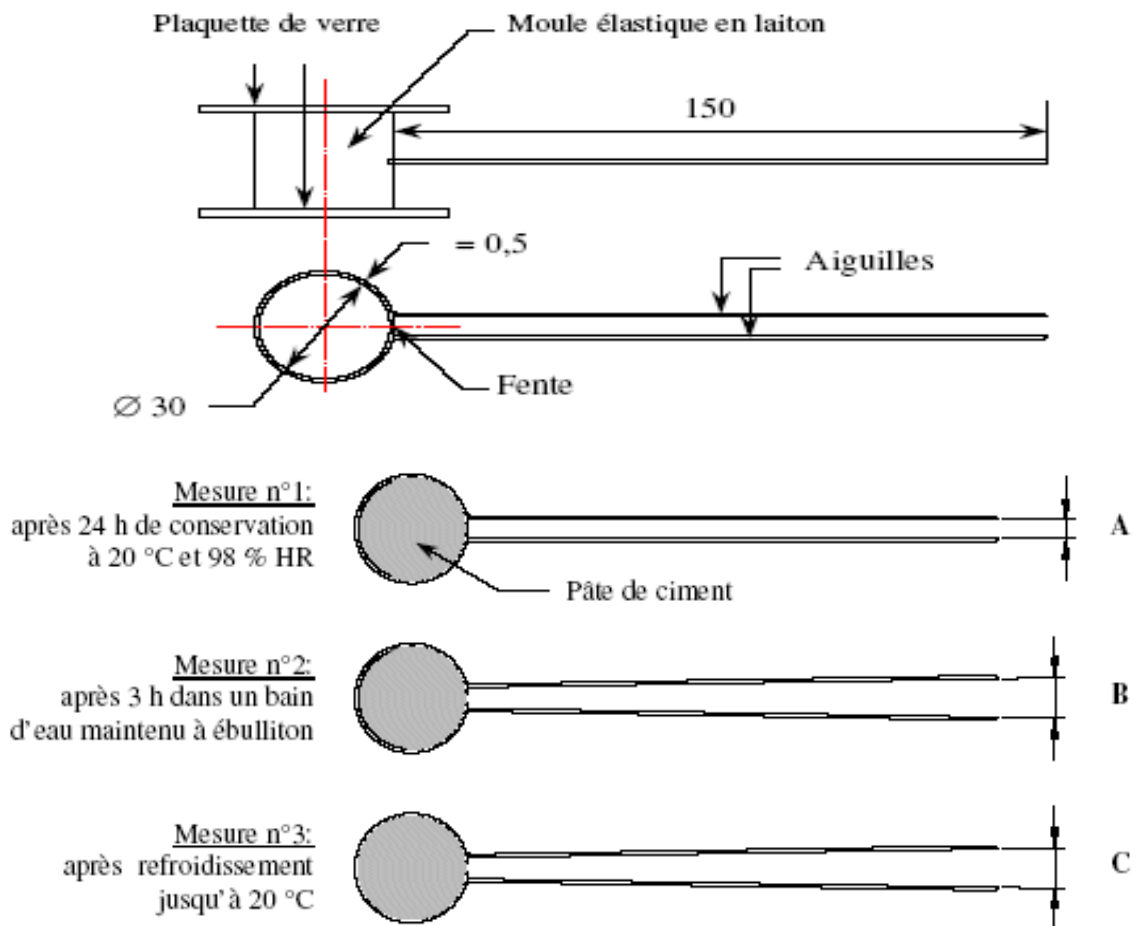
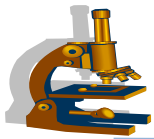
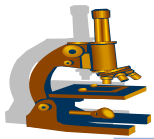


Figure 3-11 les Aiguillé de Chatelier.



Figure 3-12 Le bouilloire de Chatelier



III-4-3 Essai sur Mortier

III-4-3-1 Mortier normalisé

Dans le but de confirmer l'évolution des résistances mécaniques,

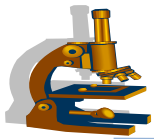
Des éprouvettes contenant un mélange ciment Portland et argile cuite ont été coulés selon la norme EN 196-3 et EN 196-1 .

L'incorporation de argile cuite dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres.

Nous avons choisi un taux de substitution du ciment Portland de (0%, 5%,10%, 15%, 20%,) selon la norme EN 196-1 NFP18-508.

	Type de ciment	Constituant du Ciment (%)			Composition des mortiers		
		Clinker (%)	Gypse (%)	Argile cuite (%)	Ciment (g)	L'eau (ml)	Sable normalisé (g)
Finesse visé 4000 (cm ² /g)	CEM Témoin CPA 0%	95	5	0	450	225	1350
	CEM01 5%	90	5	5	450	225	1350
	CEM02 10%	85	5	10	450	225	1350
	CEM03 15%	80	5	15	450	225	1350
	CEM04 20%	75	5	20	450	225	1350
Finesse visé 4500 (cm ² /g)	CEM Témoin CPA 0%	95	5	0	450	225	1350
	CEM01 5%	90	5	5	450	225	1350
	CEM02 10%	85	5	10	450	225	1350
	CEM03 15%	80	5	15	450	225	1350
	CEM04 20%	75	5	20	450	225	1350

Tableau 3-13 Composition des Mortiers.



III-4-3-2 Préparation des éprouvettes et déroulement des essais mécaniques

Les essais mécaniques ont été préparés des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ selon la norme EN 196-1 dans un malaxeur semi-automatique.

(Voir la Figure 3-13 et Figure 3-14)



Figure 3-13 Malaxeur semi-automatique de mortier
(Laboratoire de Lafarge M'sila)



Figure 3-14 Eprouvette Prismatique $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

La Méthodes d'essai des ciments et compactés mécaniquement à l'aide d'une table à choc (Figure 3-15), ou table vibrante (Figure 3-16).

Les éprouvettes sont au nombre de trois par moule.

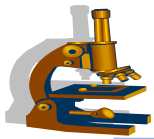


Figure 3-15 Table Vibrante
(Laboratoire de Lafarge M'sila)



Figure 3-16 Table à Choc
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

Elles sont stockées dans leurs moules pendant 24 heures dans une chambre d'humidité de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité de 90% .(Figure 3-17)



**Figure 3-17 La Chambre d'humidité
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

Ensuite elles sont démoulées.

Les éprouvettes prismatiques sont plongées sans retard dans des bains d'eau à régulation de température $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. (Figure 3-18)

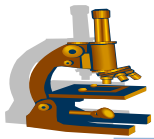


Figure 3-18 Bains d'eau (laboratoire de Lafarge M'silla)

Avant d'effectuer les essais, les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Les essais sont d'abord effectués en flexion sur une presse permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN asservie en chargement de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$.

Les essais de compression sont effectués par une presse de type Perrier d'une charge de 200KN asservie en chargement de $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$. (Voir Figure 3-19)



Les essais mécaniques ont lieu sur 4 éprouvettes et sont testés .en flexion et en compression à 2,7, 28 jours.



**Figure 3-19 Machine de Compression
(Laboratoire de Lafarge M'sila)**

III-4-3-3 Mesure du Retrait sur éprouvette de mortier normal

Objectif de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservé à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Trois prismes ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) sont préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement.

Principe de l'essai

Après le démoulage de l'éprouvette de dimension ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 , on procède immédiatement à la mesure de sa longueur puis à 3,7 et 28 jours.

Équipement nécessaire utilisé

Il est décrit dans la Norme NF P15-433.

Une salle maintenue à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ Un malaxeur normalisé.

Des moules équipés de plots de retrait en laiton. (Figure 3-02)

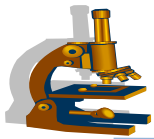


Figure 3-20 Moules (4x4x16) cm³ Équipés de plots de Retrait

Les plots sont vissés au centre de chaque face carré du moule au moment de la mise en place du mortier, puis désolidarisés du moule avant le démoulage.

Un dilatomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 5 μm .

Une tige de 160mm de longueur en invar (insensible à la variation de température pendant la manipulation) pour permettre de régler le zéro du dilatomètre.

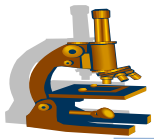


Figure 3-21 Comparateur de Retrait
(Laboratoire de Lafarge M'sila)

Conduite de L'essai

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160 mm de longueur, soit L_0 la mesure de l'éprouvette.

Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t (3, 7 et 28 jours), la longueur de l'éprouvette est :



$$L(t) = L_0 + dl(t)$$

La variation de longueur au temps t (3, 7 et 28 jours) est :

$$\Delta l(t) = L(t) - L_0 = dl(t) - dl(t_0)$$
 La variation relative de la longueur est :

$$\varepsilon(t) = \Delta l(t)/L_0 = [dl(t) - dl(t_0)]/L_0$$
 , $\Delta l(t)$ est la moyenne des trois éprouvettes issus de la même confection du mortier.

- Si les éprouvettes sont conservées dans l'air,
 $\Delta l(t)$ est négatif et on parle de retrait.
- Si les éprouvettes sont conservées dans l'eau,
 $\Delta l(t)$ est positif et on parle de gonflement.

III-4-3-4 La Chaleur d'hydratation (La méthode semi-adiabatique)

- Principe

La méthode semi-adiabatique consiste à introduire un échantillon de mortier fraîchement préparé, dans un calorimètre afin de déterminer, d'après l'évolution de la température, la quantité de chaleur dégagée. À une échéance donnée, la chaleur d'hydratation du ciment contenu dans l'échantillon est égale à la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant pendant toute la durée de l'essai.

L'échauffement du mortier est comparé à la température d'un échantillon inerte dans un calorimètre de référence. L'échauffement qui dépend principalement des caractéristiques du ciment est généralement compris entre 10 K et 50 K.

- Appareillage

1- Calorimètre

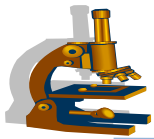
Constitué d'un vase isotherme fermé par un bouchon isolant et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support.

La construction et les caractéristiques du calorimètre utilisé pour l'essai et de celui utilisé comme référence doivent être les suivantes :

a) un vase isotherme

(Par exemple un vase Dewar), fait en verre borosilicate plaqué à l'argent ; de forme cylindrique avec un fond hémisphérique.

Ses dimensions intérieures doivent être d'environ 95 mm de diamètre et 280 mm de profondeur ; avec un diamètre extérieur de 120 mm environ.



Un disque de caoutchouc d'environ 85 mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur, doit être placé au fond du vase afin de servir d'appui au récipient contenant l'échantillon et de répartir uniformément la charge sur la paroi du vase.

b) une enveloppe très rigide

Dont la base est suffisamment large pour assurer une bonne stabilité à l'ensemble (en duralumin de 3 mm d'épaisseur, par exemple).

Le vase doit être séparé de la paroi latérale de l'enveloppe par un espace d'air de 5 mm environ et doit reposer sur un appui de 40 mm à 50 mm d'épaisseur, en matériau de faible conductibilité thermique (polystyrène expansé, par exemple).

Le bord supérieur du vase doit être protégé par un joint de caoutchouc placé à son contact.

Ce joint doit être un anneau, épais d'au moins 5 mm, en matériau de faible conductibilité thermique, fixé à l'enveloppe du calorimètre.

L'anneau doit servir à positionner le vase et à fournir une surface d'appui sur le bouchon afin d'assurer l'étanchéité du dispositif de fermeture.

c) Un bouchon isolant

Constitué de trois parties :

- **la partie inférieure**, plongeant dans le vase et dont le rôle est de limiter au maximum les pertes de chaleur vers le milieu extérieur.

Elle doit être de forme cylindrique, de diamètre égal au diamètre intérieur du vase et d'une épaisseur de 50 mm environ. Elle doit être réalisée en polystyrène expansé (classe 20 kg/m³ environ) ou en un autre matériau de caractéristiques thermiques similaires.

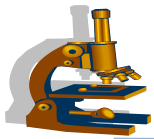
Sa base peut être protégée par une plaque de plastique (par exemple, en polyméthylméthacrylate) , de 2 mm d'épaisseur environ .

- **la partie centrale**, qui sert à assurer l'étanchéité du calorimètre tout en contribuant à la réduction des pertes de chaleur, doit être composée d'un disque de caoutchouc mousse de 120 mm de diamètre.

- **la partie supérieure**, qui a pour but d'assurer la mise en place correcte et constante du bouchon sur le vase Dewar doit être constituée d'une enveloppe rigide contenant un dispositif de fermeture rapide de manière à comprimer la partie centrale en caoutchouc mousse pour assurer l'étanchéité du bouchon.

d) caractéristiques de performance

Le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre ne doit pas dépasser 100 J.h-1.K-1 pour un échauffement de 20 K.



Le ré-étalonnage est nécessaire :

- au moins tous les quatre ans ou après 200 essais ;
- en cas de détérioration du calorimètre ou d'un composant isolant.

Afin d'éviter de dégrader l'isolation du calorimètre, la température du mortier soumis à l'essai ne doit pas dépasser 75 °C.

2- Calorimètre de référence

De même construction et caractéristiques que le calorimètre d'essai .Il doit comporter une boîte à mortier contenant un échantillon de mortier gâché au moins 12 mois auparavant (et considéré comme inerte).

3. Thermomètres à résistance de platine

Pour le calorimètre de référence et chaque calorimètre d'essai, dont la graduation doit couvrir, au moins, l'échelle de 19 °C à 75 °C. Si les conducteurs de la résistance électrique sont en cuivre, ils ne doivent pas avoir, dans la partie qui traverse le bouchon, une section supérieure à 0,25 mm².

S'ils sont en un autre métal, la résistance thermique totale par centimètre de conducteur doit être supérieure à 0,10 K.mW-1 (résistance thermique équivalant à celle d'un conducteur en cuivre de 0,25 mm² de section et de 1 cm de longueur).

La puissance calorifique dissipée par le thermomètre ne doit pas dépasser 3 mW. L'alimentation en courant continu, qui constitue un apport d'énergie, doit être évitée si la puissance calorifique dissipée excède 0,2 mW. Il est recommandé de s'assurer de la précision de l'ensemble du dispositif de mesure et d'enregistrement de la température.

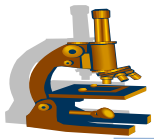
La température de l'échantillon d'essai doit être mesurée avec une précision de $\pm 0,3$ °C. Lorsque le calorimètre est étalonné *in situ* avec les conducteurs utilisés pour les essais de chaleur d'hydratation, la section totale des conducteurs sera au maximum de 0,80 mm² (quatre fils de 0,5 mm de diamètre), mais doit être telle que le coefficient de déperdition thermique du calorimètre soit inférieur à 100 J.h-1.K-1 pour un échauffement de 20 K .

La gaine de protection de ces conducteurs doit être fabriquée en matériau de faible conductibilité thermique.

4. Boîte à mortier

Consistant en un récipient cylindrique muni d'un couvercle, d'un volume d'environ 800 cm³, conçu pour contenir l'échantillon de mortier à essayer.

La boîte à mortier, perdue après chaque essai, doit être étanche à la vapeur d'eau. Ceci doit être vérifié pendant l'utilisation en pesant la boîte à mortier après chaque essai .



Elle doit être en fer-blanc contre-soudé électriquement et avoir une épaisseur nominale de 0,3 mm, un diamètre d'environ 80 mm et une hauteur d'environ 165 mm. Sa hauteur doit réserver un espace libre d'environ 10 mm entre le sommet de la boîte à mortier et le bouchon.

Le couvercle de la boîte à mortier doit être muni, en son centre, d'un étui pour thermomètre en forme de tube cylindrique fermé à sa base.

Le diamètre intérieur de l'étui doit être légèrement supérieur à celui du thermomètre.

Sa longueur doit être comprise entre 100 mm et 120 mm environ afin de lui permettre d'atteindre le coeur de l'échantillon.

5. Appareil d'enregistrement de la température

Capable d'enregistrer les mesures prises par chaque thermomètre.

6. Malaxeur à mortier : Conforme à l'EN 196-1.

Détermination de la chaleur d'hydratation

Laboratoire

La température du laboratoire où le mortier est gâché doit être maintenue à $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

La salle d'essais où la calorimétrie a lieu doit être maintenue à une température de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$.

La température affichée par le calorimètre de référence doit être considérée comme étant la température ambiante et doit être maintenue à $\pm 0,5 ^\circ\text{C}$.

La distance entre chacun des calorimètres doit être d'environ 12 cm. La vitesse de l'air de ventilation autour des calorimètres doit être inférieure à 0,5 m.s⁻¹.

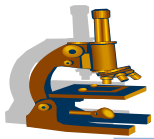
Lorsque plusieurs essais sont effectués simultanément, on doit compter au moins un calorimètre de référence pour six calorimètres d'essai ; lorsque plusieurs calorimètres d'essai sont utilisés avec un calorimètre de référence, un agencement hexagonal doit être organisé avec le calorimètre de référence au centre.

Mode opératoire

A- Composition du mortier :

La composition du mortier doit être conforme à l'EN 196-1 et l'échantillon pour essai doit avoir une masse totale de $(1\,575 \pm 1) \text{ g}$.

Chaque gâchée de mortier doit être constituée de $(360,0 \pm 0,5) \text{ g}$ de ciment ; $(1\,080 \pm 1) \text{ g}$ de sable normalisé CEN conforme aux exigences de l'EN 196-1 et $(180,0 \pm 0,5) \text{ g}$ d'eau distillée .



Comme il n'est pas possible de récupérer la totalité des matériaux versés dans le récipient du malaxeur, il convient que la gâchée de mortier soit légèrement supérieure à 1 575 g, les proportions en masse des divers constituants étant maintenues.

B- Malaxage :

Conserver le ciment, l'eau, le sable, la boîte à mortier, le récipient du malaxeur et les autres instruments en contact avec le mortier dans la salle d'essais.

Le malaxeur étant dans sa position de fonctionnement, verser le sable et ensuite le ciment dans le récipient du malaxeur ; homogénéiser le mélange de sable et de ciment pendant 30 s à petite vitesse ; verser l'eau, consigner le temps, et malaxer immédiatement à petite vitesse pendant 60 s ; régler le malaxeur sur la grande vitesse et malaxer à nouveau 60 s.

Afin d'éviter les déperditions thermiques, il est recommandé d'exécuter le malaxage dans un temps relativement court.

C'est pour cette raison que le temps de malaxage prescrit dans l'EN 196-1 a été raccourci.

C-Mise en place de l'échantillon d'essai :

Aussitôt après le malaxage, peser $(1\,575 \pm 1)$ g de mortier dans la boîte qui a été pesée au préalable, avec son couvercle, à $\pm 0,5$ g.

Mettre en place le couvercle en s'assurant qu'il assure l'étanchéité.

Remplir l'étui pour thermomètre de $(2,5 \pm 0,5)$ cm³ d'huile (par exemple de l'huile minérale fluide), afin d'améliorer le contact thermique entre l'échantillon d'essai et le thermomètre.

Peser la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g pour pouvoir contrôler, en fin d'essai, toute perte de vapeur d'eau éventuelle.

Aussitôt après, l'introduire dans le calorimètre d'essai et le refermer immédiatement avec le bouchon.

Mettre aussitôt le thermomètre en place dans l'étui pour thermomètre de manière à ce qu'il soit approximativement au cœur de l'échantillon d'essai. Sceller l'orifice de passage à travers le bouchon au moyen d'un dispositif de fermeture.

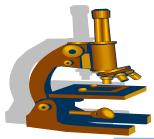
Le bouchon peut être également obturé au moyen d'un matériau d'étanchéité, malléable, ou de mastic.

Le malaxage et la mise en place de l'échantillon d'essai ne doivent pas prendre plus de 6min.

En fin d'essai, peser à nouveau la boîte à mortier à $\pm 0,5$ g.

En cas de réduction de masse supérieure à 2 g, l'essai n'est pas valable et doit être recommencé.

d- Mesure de l'échauffement :



Prendre le moment où l'on verse de l'eau comme origine des temps.

La mesure de l'échauffement consiste à relever, à des instants déterminés, la température de l'échantillon d'essai et celle de l'échantillon inerte placé dans le calorimètre de référence.

Faire au moins un relevé au cours des 30 premières minutes, suivi par des relevés effectués au moins toutes les :

1 h pendant les premières 24 h.

4 h au cours du deuxième jour .

6 h jusqu'à la fin de la période d'essai.

La fréquence de ces mesures peut être accrue en fonction des caractéristiques du ciment étudié.

Consigner l'instant de chaque relevé de température en heures et minutes.

À chaque relevé de température déterminer l'échauffement de l'échantillon d'essai, ht , comme la différence entre la température de l'échantillon d'essai, T_s , et celle de l'échantillon inerte, T_{r0} , placé dans le calorimètre de référence.



Figure 3-22 Calorimètre Langavant (Laboratoire de Lafarge M'sila).

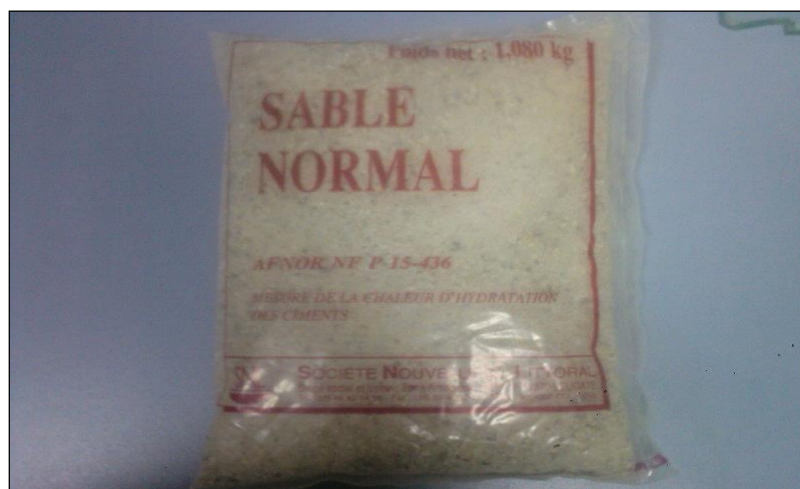
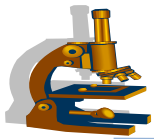


Figure 3-23 Sable Normalisé (Laboratoire de Lafarge M'sila).



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

- La finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée.
- La nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires.
- La nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique (C_3A) et silicate tricalcique (C_3A et C_3S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte.
- La température extérieure.

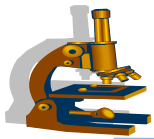
Caractéristiques du calorimètre

The screenshot shows a software window titled "Paramètres de l'essai" with a close button (X) in the top right corner. The window is divided into several sections:

- Paramètres de l'essai:** Contains input fields for "Nom de l'essai", "Date de l'essai", "Numéro de l'essai", "Voie d'essais" (set to 2), and "Temp. de référence (°C)" (set to 19.70).
- Observations:** A large text area with five horizontal lines for notes.
- Caractéristiques du calorimètre:** Includes "Numéro" (16), "Coefficient de déperdition thermique (J/h.°C):" with a formula $67.30 + T(^{\circ}C) \times 0.162$, "Capacité thermique à vide (J)" (663.00), and "Capacité thermique totale (J)" (2 487.20).
- Echelles du 705:** Includes "Maximum voie" (100.00) and "Unités" (set to >C).
- Caractéristiques de l'éprouvette:** Includes "Nature du ciment" (0), "Masse du ciment (g)" (360.00), "Masse de l'eau (g)" (180.00), "Masse du sable (g)" (1 080.00), "Masse de la boîte (g)" (134.80), "Masse des accessoires (g)" (44.60), and "Température de gâchage (°C)" (22.00).

At the bottom, there are two buttons: "Annuler" (green) and "OK" (yellow).

Figure 3-24 Caractéristiques du calorimètre (Laboratoire de Lafarge M'sila).



III-4-3-5 Microscope électronique à balayage

Le principe du MEB consiste à utiliser les électrons émis par la surface d'un solide lorsqu'elle est bombardée par un faisceau d'électrons dont l'énergie est de l'ordre de quelques Kev. Le faisceau d'électrons émis par un filament de tungstène est d'abord accéléré puis concentré. Un dispositif intermédiaire permet au faisceau de balayer la surface à examiner. Au point d'impact, plusieurs rayonnements sont émis, mais seuls les électrons secondaires et rétrodiffusés contribuent à la formation de l'image de topographie de l'échantillon.

Cette technique apporte des informations sur la morphologie des matières premières au cours du durcissement des pâtes de ciment ou mortiers. Les essais ont été réalisés avec un microscope électronique à balayage de l'institut Algérien de pétrole (I.A.P) de Boumer des de marque TESCAN piloté par un logiciel RONTEC, pour le traitement des données tel que la topographie, la composition chimique et la répartition des oxydes dans l'échantillon. Sur une pastille en lame mince préalablement recouverte d'une mince couche d'argent par métallisation sous vide pour obtenir des images en électrons secondaire.