

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعد دحلب ال بلدة 1

Université Saad Dahleb-Blida 1

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Polycopié pédagogique

**Travaux pratiques liants
Destiné aux étudiants de Master 1 – Génie Civil**

**Élaboré par Dr. Benyahia Amar
Maitre de conférence – classe B**

Septembre 2022

Avant-propos

Le présent manuscrit qui s'intitule « Travaux pratiques liants (TP-LIANTS) » est destiné aux étudiants de Master 1- Matériaux en Génie Civil. Rédigé de manière claire et simplifiée, le polycopié traite les différents modes opératoires pour la caractérisation des liants hydrauliques et aériens selon les normes en vigueur. Avant de commencer la partie essai, un rappel de cours sur la fabrication des liants est présenté. Ce polycopié de cours s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre traite les principaux essais effectués sur les ciments à savoir, l'essai de prise, granulométrie laser, perte au feu, finesse, masse volumique, analyse minéralogique par diffraction de rayons X, détermination de la résistance à la compression et la résistance à la flexion.

Dans le deuxième chapitre on s'intéresse à la chaux hydraulique. En effet, les modes opératoires à savoir, la détermination du temps de début et de fin de prise, la détermination de la stabilité de volume et en fin la détermination des résistances mécaniques sont présentées dans ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à la chaux aérienne. Dans ce chapitre, les modes opératoires pour les essais de détermination de la teneur en oxyde de calcium et de magnésium, la détermination de la chaux vive, la détermination de la réactivité de la chaux vive ainsi que la finesse de mouture sont brièvement présentées.

En fin, le quatrième chapitre aborde le plâtre. Ce chapitre comporte, le mode opératoire pour la détermination de la finesse de mouture ainsi que le mode opératoire pour la détermination de la résistance en compression et en flexion.

Sommaire

Table des matières.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Liste des notations.....	iv
Informations sur le cours.....	1

Chapitre I

Ciment

I.1 Fabrication du ciment Portland.....	4
I.2 Essai de consistance et de prise du ciment.....	12
I.3 Mesure de la granulométrie laser des particules de ciment.....	21
I.4 Mesure de la perte au feu du ciment.....	26
I.5 Mesure de la surface spécifique du ciment.....	28
I.6 Technique de diffraction des rayons X sur les particules de ciment.....	31
I.7 Mesure de la résistance mécanique d'un mortier de ciment.....	35

Chapitre II

Chaux hydraulique

II.1 Processus de fabrication de la chaux hydraulique.....	42
II.2 Essai de consistance et de la prise de la chaux hydraulique.....	44
II.3 Mesure de la stabilité de volume de la chaux hydraulique.....	47
II.4 Mesure de la finesse de la chaux hydraulique par tamisage à sec.....	50
II.5 Essai de la réactivité de la chaux hydraulique.....	52
II.6 Essai de résistance en compression.....	53

Chapitre III

Chaux aérienne

III.1 Détermination de la chaux libre contenue dans la chaux aérienne.....	58
--	----

Chapitre IV

Plâtre

IV.1 Fabrication du plâtre.....	61
IV.2 Consistance du plâtre.....	62
IV.3 Temps de prise du plâtre.....	63
IV.4 Finesse de mouture du plâtre.....	64
IV.5 Résistance en compression du plâtre.....	65
Références bibliographiques.....	66
Annexe.....	69

Liste des Figures

Figure I.1	Processus de la fabrication du ciment.....	4
Figure I.2	Microstructure du clinker.....	4
Figure I.3	Notation des ciments.....	9
Figure I.4	Observation au microscope électronique de la microstructure de la pâte de ciment hydraté.....	10
Figure I.5	Observation au microscope électronique a) - Ettringite (AF), b) Mono sulfo-aluminates (AFm).....	10
Figure I.6	Appareil de Vicat.....	12
Figure I.7	Cône de Marsh.....	12
Figure I.8	Diaphragme triangulé.....	13
Figure I.9	Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C.....	14
Figure I.10	Les différentes phases de prise et de durcissement de la pâte de ciment.....	15
Figure I.11	Mesure du début et de fin de prise du ciment.....	16
Figure I.12	Le temps de fin de prise non atteint et b) Le temps de fin de prise est atteint.....	16
Figure I.13	Distribution de taille des particules.....	22
Figure I.14	Résultats de mesures de granulométrie laser sur un ciment (modèle1)	23
Figure I.15	Résultats de mesures de granulométrie laser sur un ciment (modèle2)	23
Figure I.16	Distribution de la taille des grains du ciment.....	24
Figure I.17	Four pour la calcination des liants.....	26
Figure I.18	Perméabilimètre de Blaine.....	28
Figure I.19	Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine.....	29
Figure I.20	Diffractogramme des rayons X sur poudres.....	31
Figure I.21	Résultat obtenu après le bombardement d'une poudre cristalline par un faisceau de rayons X.....	32
Figure I.22	Broyage de la poudre.....	32
Figure I.23	Préparation de la pastille.....	32
Figure I.24	Insertion de la pastille dans le DRX.....	33
Figure I.25	DRX en marche.....	33
Figure I.26	Allures des pics caractéristiques des alites M3 (A), M1+M3 (B), M1 (C) dans des diffractogrammes de clinkers (radiation $CuK\alpha$).....	45
Figure I.27	Spectre rayons X-clinker.....	34
Figure I.28	Malaxeur à mortier.....	36
Figure I.29	Essai de traction par flexion.....	37
Figure I.30	Essai de compression.....	37
Figure II.1	Processus de fabrication de la chaux.....	42
Figure II.2	Cycle de la chaux.....	43
Figure II.3	Table à secousses pour essai de consistance sur une pâte pure de chaux hydraulique.....	44
Figure II.4	Appareil Le-Chatelier.....	47
Figure II.5	Bouilloire Le-Chatelier.....	47
Figure II.6	Essai de stabilité de volume a) remplissage du moule, b) protection du moule, c) et d) mesure de distances entre points indicateurs	48
Figure II.7	Appareil de mesure de la réactivité de la chaux.....	52
Figure III.1	Préparation d'une solution de saccharose.....	59
Figure IV.1	Fabrication du plâtre.....	61

Liste Des tableaux

Tableau I.1	Ciments courants.....	6
Tableau I.2	Domaines d'utilisation des ciments.....	7
Tableau I.3	Les exigences mécaniques des ciments selon la norme EN 196-1....	8
Tableau I.4	Valeurs limites absolues des résistances à la compression des ciments.....	8
Tableau I.5	Exigences physiques des ciments.....	9
Tableau I.6	Exigences chimiques des ciments.....	9
Tableau I.7	séquences de malaxage du mortier	37

Notations

32.5N : résistance courante

32.5R : résistance à court terme

A : alumine

AF : étringite

AFm : mono-sulfo aluminat

AFt : étringite

C : chaux

C₂S : silicate bicalcique

C₃A : aluminat tricalcique

C₃S : silicate tricalcique

C₄F : alumino-ferrite tétracalcique

Ca(OH)₂ : Portlandite

CaO : chaux libre

CEMI : ciment Portland

CEMII : ciment avec ajout

CEMIII : ciment de hauts fourneaux

CEMIV : ciment pouzzolanique

CEMV : ciment composé

C-S-H : gel de sulfate de calcium hydraté

D₅₀ : diamètre médian

F : oxyde de fer

PAF : perte au feu

S : silice

η : viscosité de l'air

ρ_{abs} : masse volumique

σ : contrainte

Informations sur le cours



Introduction

Le présent manuscrit est un outil d'aide qui s'adresse en particulier aux étudiants de Master 1, option matériaux en Génie Civil après avoir acquis certaines connaissances en résistance des matériaux, en béton armé et en matériaux de construction (liants minéraux), pendant leur parcours académique. Dans ce manuscrit, différents modes opératoires sur les liants minéraux sont présentés selon les normes en vigueur, en commençant par le ciment, en passant par la chaux (hydraulique et aérienne) et en terminant par le plâtre.

Il est capital de rappeler que le TP est un travail à caractère professionnel, sous forme d'un travail d'ingénierie réalisé en sous-groupes (travail collaboratif). Le but des Travaux pratiques effectués au laboratoire est de développer l'autonomie et la responsabilité des étudiants, de créer une dynamique de groupe et l'esprit d'un travail collaboratif, de mettre en pratique les enseignements reçus lors du cursus Licence génie civil, Permettre ainsi aux étudiants d'affirmer leurs savoir-faire (similaire à celui d'un ingénieur) et à considérer leurs compétences.



L'objectif général du TP

Le TP Liant permet de :

Caractériser les liants minéraux à savoir, le ciment, la chaux et le plâtre.

Les objectifs spécifiques du cours

L'étudiant est appelé à montrer ses aptitudes et ses capacités scientifiques et techniques acquises pour:

- ✓ Effectuer les essais selon les normes en vigueur ;
- ✓ Analyser les résultats obtenus et formuler des conclusions pertinentes ;
- ✓ Valoriser le travail effectué et les résultats obtenus ;
- ✓ Rédiger un compte rendu clair et synthétique, exploitable par l'enseignant.



Mode d'évaluation (control continu 100%)

- Compte rendu sur 40% ;
- TP test sur 60%.



Consignes générales de sécurité

Avant d'accéder au laboratoire, chaque étudiant doit impérativement retenir quelques pictogrammes de sécurité.

Risques physiques

	Surface chaude : risque de brûlures		Objet tranchant : risque de coupure ou lacération		Pièce en mouvement : risque d'écrasement
	Basse température : risque de brûlures par le froid		Pièce en mouvement: risque d'écrasement mains		Angle rentrant: risque d'entraînement et d'écrasement
	Démarrage automatique : risques multiples		Électricité : risque d'électrisation, d'électrocution		Bouteille pressurisée : risque d'explosion en présence de flamme
	Rayonnement laser : risques pour les yeux		Champ électromagnétique		Rayonnement optique (UV, visible, IR)
	Champ magnétique puissant		Bruit élevé soudain Risque acuité auditive		Attacher les cheveux. Risque avec pièces mobiles et flamme.
	Interdit : manches longues, foulard, cravate, etc.		Risque de projection		Risque de lacérations et de brûlures

Risques chimiques

	<ul style="list-style-type: none"> • Gaz, aérosols, liquides, matières solides inflammables • Matières autoréactives (type C à F) • Liquides, matières solides pyrophoriques • Matières autochauffantes • Peroxydes organiques (type C à F) • Matières et mélange qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables 		<ul style="list-style-type: none"> • Matières autoréactives (type B) • Peroxydes organiques (type B)
			B – Matières inflammables et combustibles (B1 à B6) Inflammables = point éclair < 37.8 °C (100 °F) Combustibles = point éclair ≥ 37.8 °C (100 °F)
	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicité aiguë (cat. 1, 2 et 3) 		D1 – Matières ayant des effets toxiques immédiats et graves
	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicité aiguë (cat. 4) • Irritation cutanée • Irritation oculaire • Sensibilisation cutanée • Toxicité pour certains organes cibles (exposition unique, cat. 3) • Danger pour la couche d'ozone 		<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisant respiratoire • Mutagénicité des cellules germinales • Cancérogénicité • Toxicité sur la reproduction • Toxicité pour certains organes cibles (exposition unique, cat. 1,2 et répété) • Danger par aspiration
	D2 – Matières ayant d'autres effets toxiques		D3 – Matières infectieuses <ul style="list-style-type: none"> • Matières infectieuses présentant un danger biologique (Règlement sur les produits dangereux)

Chapitre I - Ciment



I.1 Fabrication du ciment Portland

Le ciment est une poudre finement broyée obtenue à partir d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportions moyennes de 80% et 20%, respectivement, dont la propriété est de durcir même sous l'eau, de ce fait le ciment Portland est appelé liant hydraulique. Les principales étapes de fabrication de ciment sont représentées sur la Figure I.1 [1].

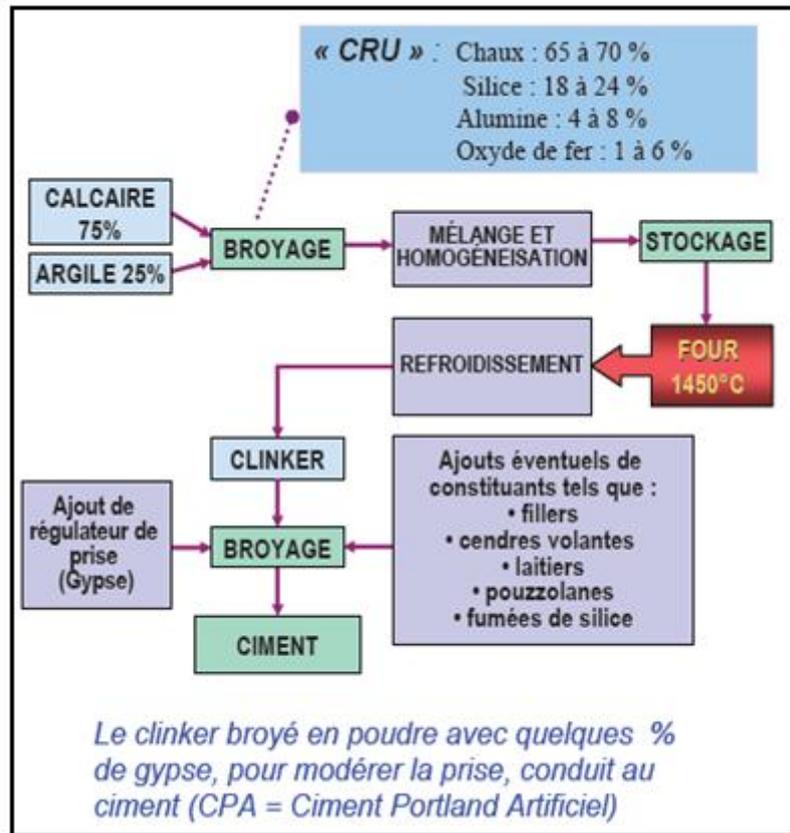


Figure I.1- Processus de la fabrication du ciment

Le clinker issu du four, possède des phases minérales représentées sur la Figure I.2 [2], sa composition chimique est calculée suivant une formule théorique (formule de Bogue).

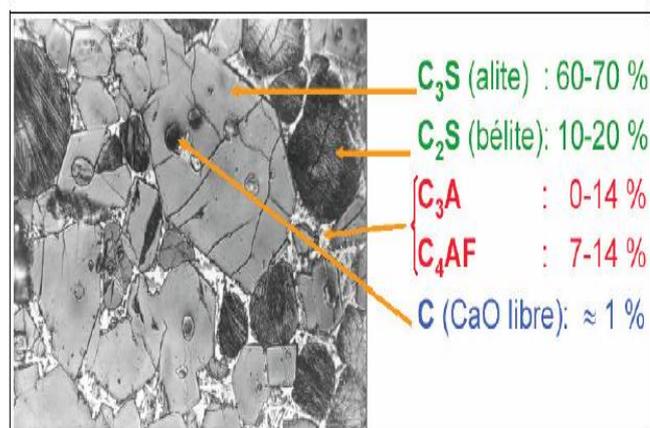


Figure I.2- Microstructure du clinker

La composition chimique du clinker selon la formule de Bogue

$$C_3S = 4.07 (\text{CaO}) - 7.60 (\text{SiO}_2) - 6.72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85 (\text{SO}_3) \quad (\text{Equ.I.1})$$

$$C_2S = 2.87 (\text{SiO}_2) - 0.75 (3\text{CaOSiO}_2) \quad (\text{Equ.I.2})$$

$$C_3A = 2.65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69 (\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (\text{Equ.I.3})$$

$$C_4AF = 3.04 (\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (\text{Equ.I.4})$$

Notons que les termes entre parenthèses représentent les fractions massiques des différents oxydes du ciment. La notation cimentière aide à simplifier les formules des compositions chimiques suivantes :

❖ Silice	SiO ₂	S
❖ Chaux.....	CaO.....	C
❖ Alumine.....	Al ₂ O ₃	A
❖ Oxyde de Fer.....	Fe ₂ O ₃	F

I.1.1 Les ciments courants

La norme de référence des ciments courants produits en Algérie est la NA 442 (EN 197-1) [3]. Les ciments sont subdivisés en cinq catégories principales en fonction de la nature et la proportion des constituants, ils sont repérés par des chiffres romains (CEMI, CEMII,... etc), ainsi que 27 produits de la famille des ciments avec des spécificités physiques, mécaniques et chimiques (Tableau I.1) [4].

Le tableau I.1, illustre les 5 principaux types et les 27 produits de la famille des ciments courants selon la norme en vigueur NA 442 (EN 197-1) [3].

Tableau I.1- Ciments courants

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse)										Constituants secondaires			
			Constituants principaux													
			Clinker K	Laitier de haut fourneau S	Fumée de silice D	Pozzolanes		Cendres volantes		Schiste calciné T	Calcaire					
Naturelle P	Naturelle calcinée Q	Silicieuse V				Calcique W	L	LL								
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5
	Ciment Portland composé	CEM II/A-M	80-94	← 6-20 →								—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →								—	—	—	—	0-5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Ciment pouzzolanique c)	CEM IV/A	65-89	—	← 11-35 →					—	—	—	—	0-5		
		CEM IV/B	45-64	—	← 36-55 →					—	—	—	—	0-5		
CEM V	Ciment composé c)	CEM V/A	40-64	18-30	—	← 18-30 →		—	—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	← 31-50 →		—	—	—	—	—	—	—	0-5	

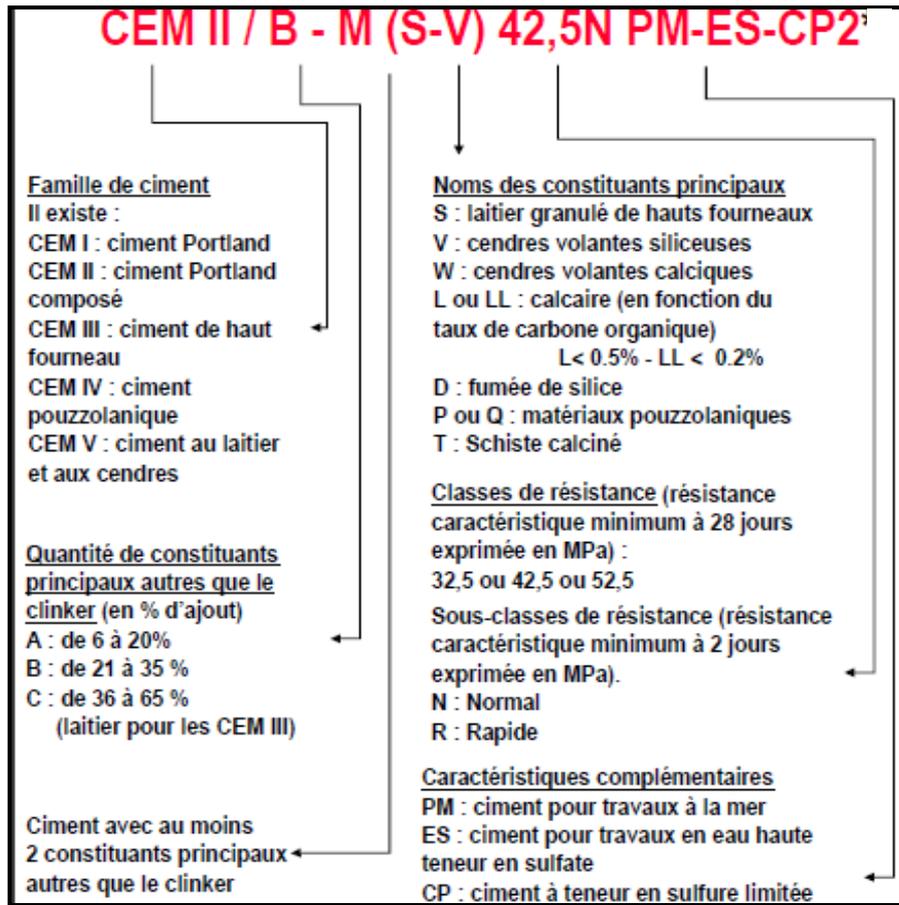


Figure I.3- Notation des ciments

Chaque famille et sous famille du ciment possède des caractéristiques spécifiques lorsqu'elles sont utilisées pour la confection des bétons (Tableau I.2) [4].

Tableau I.2- Domaine d'utilisation du ciment

Famille	Désignation	Utilisation
Ciment Portland sans constituants secondaires	Ciment Portland	Béton armé ou précontraint exigeant des résistances élevées avec court délais de décoffrage. Préfabrication. Convient particulièrement à tous les travaux courants en béton armé dans l'air.
Ciment Portland sans constituants secondaires	Ciment Portland composé	Convient particulièrement à tous les travaux courants en béton armé ou précontraint dans l'air, le sol ou l'eau, sans agressions particulières. Convient particulièrement pour les produits moulés .supporte bien l'étuvage.
Ciment à base de laitier	Ciment de haut fourneau	Convient aux ouvrages massifs, aux travaux en béton armé en milieux humides et agressifs. Travaux souterrains.
	Ciment de laitier au clinker	Convient pour les réservoirs à liquides fermentescibles, sols d'usines chimiques. Par contre ne doit pas être utilisé dans les constructions des réservoirs pour produits alimentaires.
Ciments divers	Ciment pouzzolanique	Tous travaux en béton armé, précontraint, grande masse, travaux maritimes, donnent des bétons gras et onctueux. Bonne imperméabilité.
	Ciment alumineux fondu	Travaux nécessitant des résistances mécaniques élevées dans un délai très court. Mélangé avec CEMI, donnent un ciment prompt. Nécessite un outillage très propre. Travaux par temps de gel, à la mer, en présence de milieux agressifs.
	Ciment de laitier aux cendres	Travaux importants en béton armé, aériens et hydraulique. Travaux en milieux agressifs. Travaux en grandes masses. Craint peu de dessiccation.
	Ciment prompt	Scellement. Travaux urgents, aveuglement de voies d'eau. projection en souterrains, travaux à la marée et en milieu agro-alimentaire, préparation d'enduits. Enduits chaux –prompt en restauration.

I.1.2 Exigences sur les ciments

Le Tableau I.3 [5], fixe la valeur maximale de la résistance normale à 28 jours pour les ciments de classe de résistance 32.5, 42.5 et 52.5.

Tableau I.3- Les exigences mécaniques des ciments selon la norme Algérienne NA 234 (EN 196-1)

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	(2 jours)	(7 jours)	(28 jours)	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$	-		
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$	-		
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30,0$	-		

Les résultats à la compression du ciment commercialisé doivent garantir les valeurs du Tableau I.4[6].

Tableau I.4- Valeurs limites absolues des résistances à la compression des ciments

Échéances	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
2 jours	-	8,0	8,0	18,0	18,0	28,0
7 jours	14,0	-	-	-	-	-
28 jours	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0

Les caractéristiques physiques des 6 classes de résistance sont définies dans le Tableau I.5[6].

Tableau I.5- Exigences physiques des ciments

Classes de résistance	Temps de début de prise (mn)	Expansion (mm)
32,5 N	≥ 75	≤ 10
32,5 R		
42,5 N	≥ 60	
42,5 R		
52,5 N	≥ 45	
52,5 R		

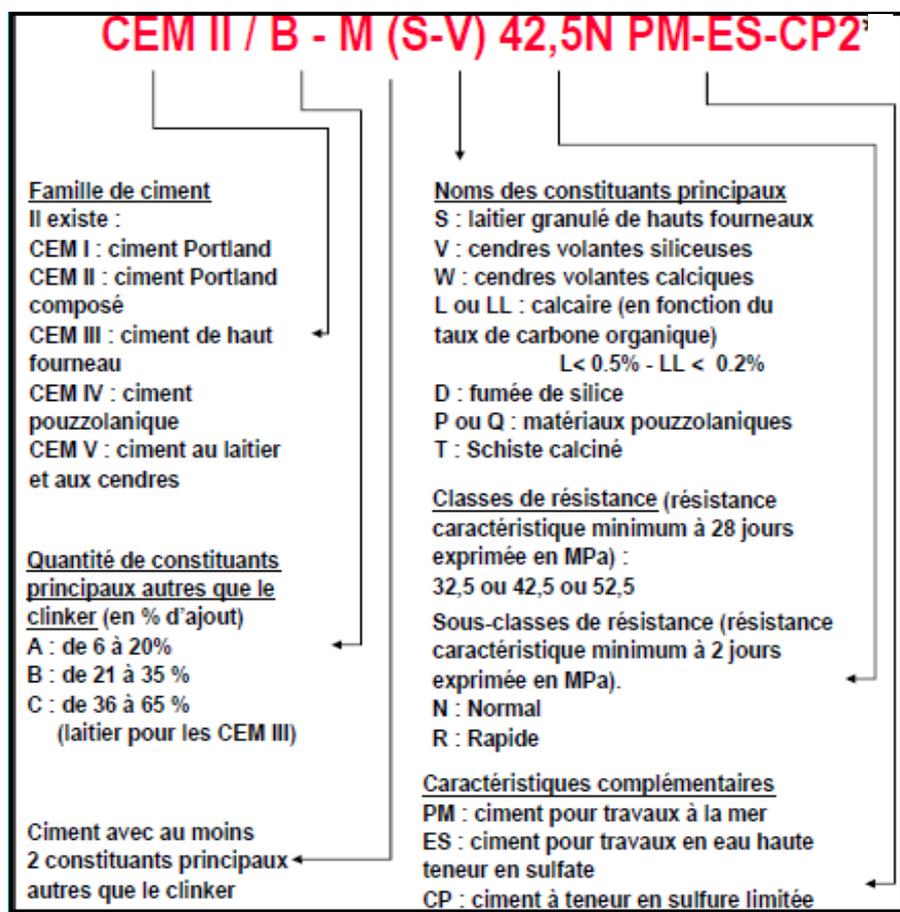
Les caractéristiques chimiques des ciments doivent garantir les exigences de la norme Algérienne en vigueur NA 5042 (EN 196 – 2)[7].

Tableau I. 6- Exigences chimiques des ciments

Désignation	Pourcentage	Type de ciment
Perte au feu (PAF)	$\leq 5 \%$	CEM I / CEM III
Résidu insoluble (RI)	$\leq 5 \%$	CEM I / CEM III
Sulfate	$\leq 3,5 \%$ / 4%	Tous types
Chlorures	$\leq 0,10 \%$	Tous types

I.1.3 Désignation d'un ciment courant

Selon la norme NA 442 (EN 197-1) [3], les ciments sont notés à l'aide de 3 à 6 caractéristiques [1], le cas de l'exemple ci-dessous (Figure I.3).

**Figure I.3-** Notation des ciments

I.1.4 Hydratation des phases principales constituant le ciment

La prise du ciment n'est pas seulement un passage d'un état frais à un état durci de la pâte mais c'est un processus de réactions chimiques dans lequel les constituants principaux du ciment (silicates et aluminates) réagissent pour former des composés insolubles assurant un passage lent entre les deux états.

❖ Hydratation des silicates de calcium

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques 3CaSiO_2 (C_3S) qui est la phase principale constituant le clinker et les silicates bicalciques 2CaSiO_2 (C_2S), se dissolvent sous forme d'ions qui s'interagissent entre eux pour former un gel de sulfate de calcium hydraté (C-S-H) et de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Figure I.4) [8].

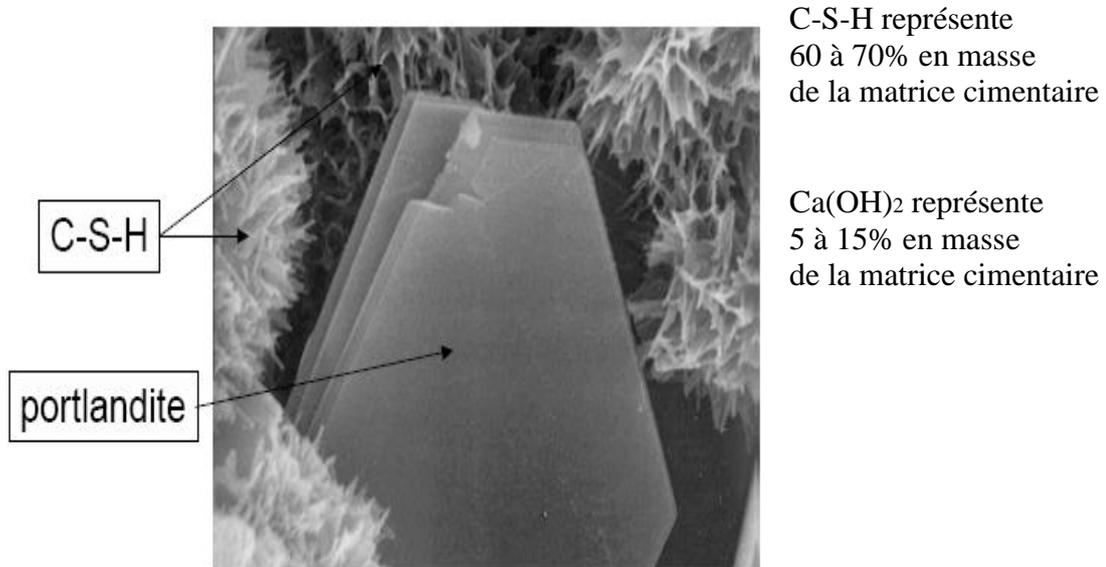


Figure I.4- Observation au microscope électronique de la microstructure de la pâte de ciment hydraté

❖ Hydratation des aluminates de calcium

L'hydratation des aluminates a un effet notable sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment, ces composés très réactifs, s'hydratent rapidement, pour cette raison que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker afin de contrôler ces réactions.

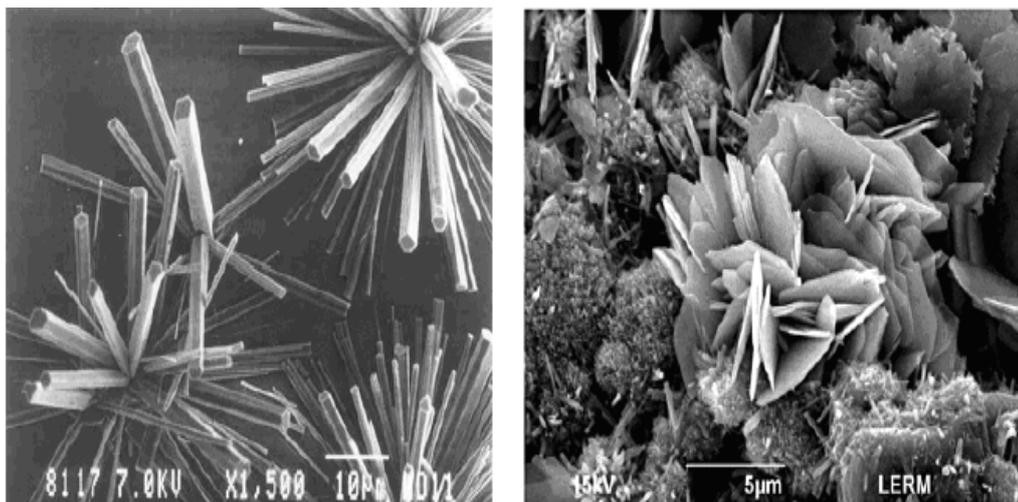


Figure I.5- Observation au microscope électronique a)- Ettringite (AF), b) Mono sulfo-aluminates (AFm)

En absence du sulfate de calcium, le C_3A réagit de façon presque instantanée formant des aluminates de calcium hydratés qui se cristallisent sous forme de plaques hexagonales C_3AH_8 et C_4AH_{13} ou bien en cristaux cubiques C_3AH_6 (Figure I.5 a) [8]. En présence du sulfate de calcium, le C_3A réagit pour former l'étringite qui se cristallise sous forme d'aiguilles prismatiques ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). Quand tout le gypse est combiné, le C_3A réagit avec l'étringite pour donner les monosulfo-aluminates de calcium et les aluminates hydratés (Figure I.5b) [8]. L'hydratation du C_4AF suit le même cheminement que le C_3A sauf que, les aluminates sont substitués par le fer.

I.2 Essai de consistance et de prise

Lorsqu'on ajoute de l'eau à un ciment, il se forme une pâte, possible de la malaxer et de la mouler dont le but de préparer un mortier voire un béton. Cependant, après un certain moment (t en min) se produit l'hydratation du ciment c'est-à-dire la pâte commence à durcir lentement (prise) jusqu'à son durcissement. A cet effet, deux questions peuvent être posées :

Quel dosage d'eau faut-il ajouter au ciment pour que la prise se produise ?

Au bout de combien de temps la prise de la pâte commence-t-elle ?

I.2.1 Consistance de la pâte de ciment

L'essai de consistance de la pâte de ciment est gouverné par la norme NA 229 (NE 2-1-003) [9]. Le but de l'essai est de repérer la consistance normalisée d'une pâte de ciment (état plus ou moins ferme) après avoir effectué plusieurs tentatives sur le pourcentage d'eau requis (ni peu ni trop d'eau) par des essais de pénétration d'une sonde dans la pâte de ciment avec des quantités d'eau différentes. En effet, il existe deux essais qui permettent d'évaluer la consistance de la pâte de ciment à savoir :

- ✓ L'essai de consistance effectué avec l'appareil de Vicat du nom de l'ingénieur français.
- ✓ L'essai d'écoulement au cône .



Figure I.6- Appareil de Vicat



Figure I.7- Cône de Marsh pour ciment



Principe de l'essai

On mesure l'enfoncement d'une sonde de diamètre 10mm, fixée à la partie mobile (masse 300 g) de l'appareil de Vicat [10] dans le moule tronconique contenant la pâte de ciment. L'enfoncement de la tige est étroitement lié à la consistance de la pâte. En effet, la consistance normalisée est atteinte lorsque l'enfoncement de la tige dans la pâte est $d = 6 \pm 1 \text{ mm}$ après 30s de l'enfoncement. Si l'enfoncement d est hors cette plage de mesure on fait varier le dosage d'eau.

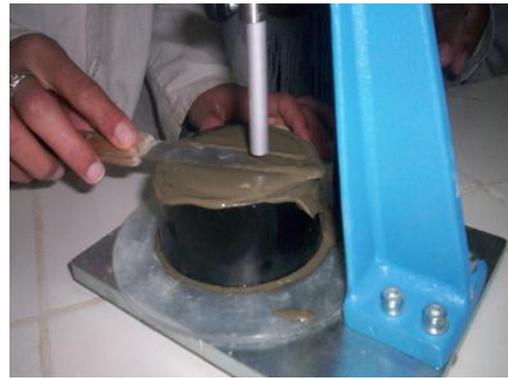
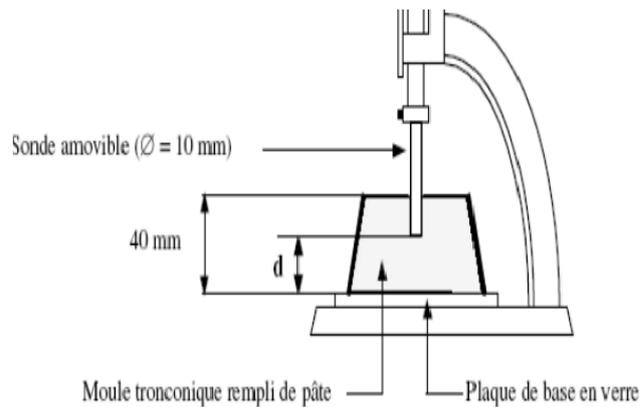


Figure I.8- Appareil de Vicat muni d'une sonde NA 228 (NF P 15-414)



Equipement nécessaire

Pour préparer la pâte de ciment, on utilise :

- ✓ Une balance de portée 5kg avec une précision de 1 g ;
- ✓ Un chronomètre précis à 1 s près ;
- ✓ Un malaxeur conforme à la norme EN 196-1[5], avec une cuve de 5 litres de contenance, pourvu d'une de 2 vitesses (lente et rapide).
- ✓ Les éprouvettes graduées en plastique ;
- ✓ Une spatule.

Pour mesurer la consistance, on utilise :

- ✓ un appareil de VICAT composé d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde 10 mm de diamètre. La partie coulissante a une masse totale de 300 g .
- ✓ Un moule de VICAT de forme tronconique, de hauteur 40 mm, de diamètre supérieur 70 mm et de diamètre inférieur 80 mm ;
- ✓ Une plaque de base plane, plus large que le moule, et d'une épaisseur d'au moins de 2,5 mm.



Mode opératoire

- ✓ Baisser la sonde jusqu'à la base plane et ajuster le repère au zéro ;
- ✓ Relever la sonde à la position en attente.
- ❖ **Malaxage de la pâte de ciment**
 - ✓ Introduire une quantité d'eau choisie soit environ 125g ($E/C = 0.25$);
 - ✓ Peser 500 g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur dans un temps compris entre 5 à 10s et prendre le temps zéro ;
 - ✓ Mettre le malaxeur en marche pendant 90s à une vitesse lente ;
 - ✓ Arrêter le malaxeur pendant 15 secondes durant lesquelles la pâte adhérente a la cuve est grattée ;
 - ✓ Remettre le malaxeur en marche pendant 90 secondes. Le malaxage doit durer au total 3 min.
 - ✓ Remplissage du moule sans compactage.

I.2.2 Essai de pénétration

- ✓ Placer le moule rempli de la pâte de ciment dans l'axe de la sonde ;
- ✓ Abaisser la sonde jusqu'à ce qu'elle soit au contact la surface de la pâte ensuite lâcher la partie mobile sans vitesse initiale (4min après le temps de référence 0);
- ✓ Laisser la sonde pénétrer dans la pâte pendant 30s et lire l'enfoncement ;
- ✓ Recommencer le même travail jusqu'à l'obtention d'un enfoncement $d=6\pm 1\text{mm}$;
- ✓ Tracez le graph d en fonction de E/C et déduire la consistance normalisée de la pâte de ciment.

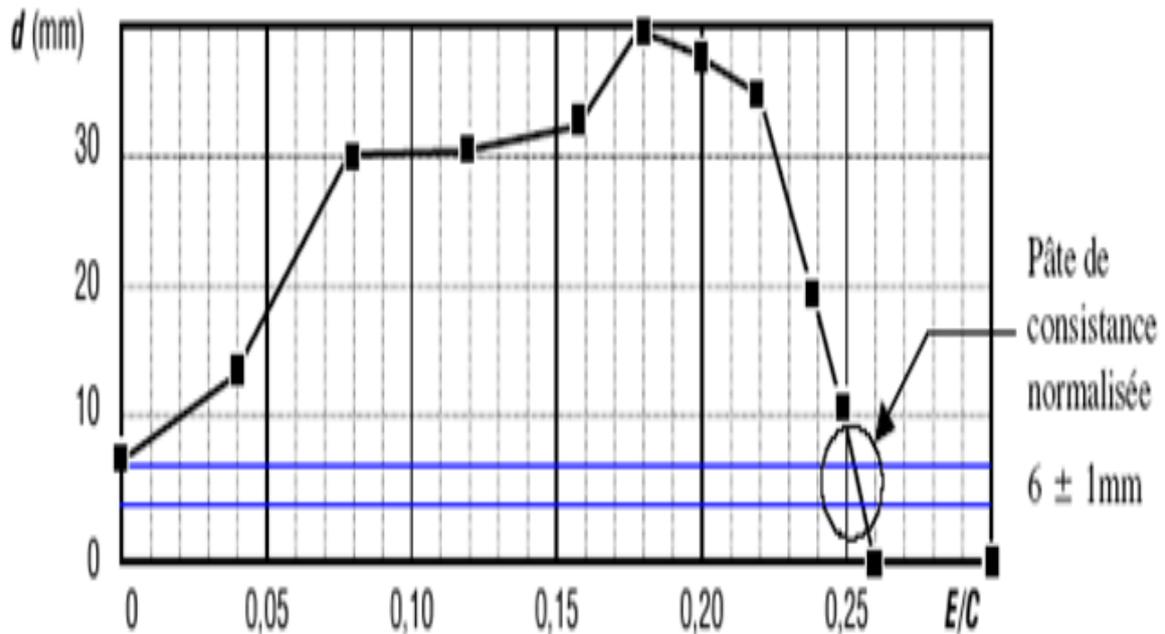


Figure I.9- Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C

I.2.3 Temps de prise du ciment

L'essai de prise du ciment est gouverné par la norme NA 230 (EN 196-3:1995 P15-473) [11]. L'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux (pâte de ciment humide) c'est-à-dire depuis que les grains de ciment entrent en contact avec l'eau jusqu'au durcissement de la pâte. En effet, la prise et le durcissement du béton se font en 3 étapes [12], à savoir;

- Phase dormante : c'est une phase invisible à l'œil nu qui marque le début des réactions chimiques. L'hydratation des grains de ciment (silicates tricalciques et silicates bi6 calciques) reste lente. En effet, le béton frais conserve sa maniabilité et reste utilisable.
- Début de prise : à la fin de la période dormante succède le phénomène de prise qui correspond à l'accélération des réactions chimiques d'hydratation du ciment. Le début de prise est déterminé à l'instant où l'aiguille de Vicat (diamètre 1.13mm) ne s'enfonce plus jusqu'au fond dans un moule tronconique rempli de pâte pure ($d=4\pm 1\text{mm}$). En effet, la prise de la pâte pure de ciment a toujours lieu avec dégagement de chaleur et de retrait.
- Fin de prise : correspond au moment où la pâte cesse d'être déformable (l'aiguille ne s'enfonce plus que 0.5mm dans la pâte de ciment) et devient un matériau rigide.
- Durcissement : La poursuite de l'hydratation se traduit par le durcissement. On considère que le béton atteint sa résistance maximale au bout de 28 jours.

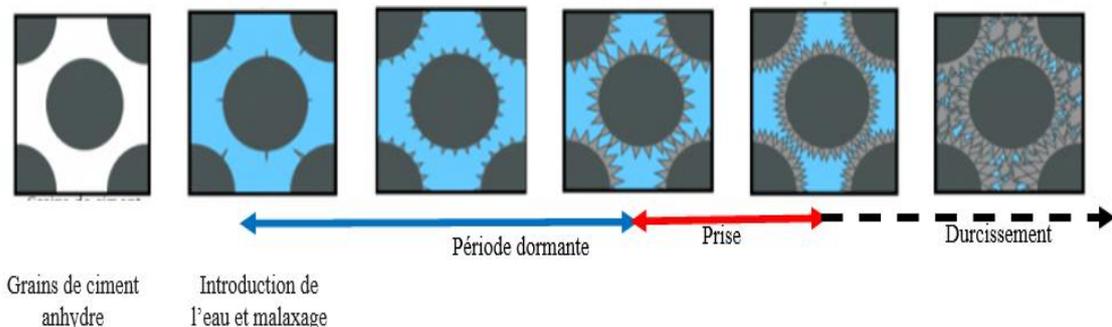


Figure I.10- Les différentes phases de prise et de durcissement de la pâte de ciment



Mode opératoire

Pour évaluer le temps de prise de la pâte de ciment il est conseillé de fabriquer deux échantillons de pâte de ciment. La première est destinée pour l'évaluation du temps de prise et la deuxième pour mesurer l'évolution de la température T au cours du temps. La préparation des mélanges de la pâte de ciment suit les mêmes étapes que celles de l'essai de consistance en prenant le rapport E/C celui qui a donné une consistance normalisée ($6\pm 1\text{mm}$). Avant de commencer l'essai, il faut :

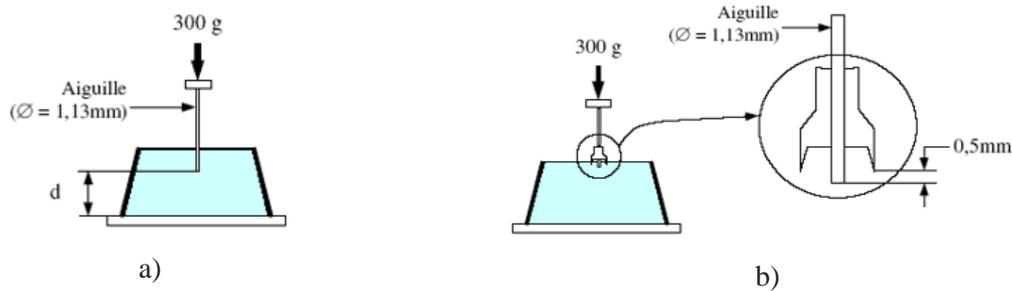


Figure I.11- a) Mesure du début de prise et b) Mesure de la fin de prise

- Enlever la sonde de consistance et de la remplacer avec l'aiguille de début de prise (diamètre 1.13mm) ;
- Abaisser la partie mobile munie de l'aiguille à la base qui contient le moule et régler le zéro de l'appareil ;
- Remonter la partie mobile pour que vous puissiez poser le moule contenant la pâte de ciment ;
- Quatre minutes après le début du malaxage, l'aiguille est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan. L'aiguille s'enfonce dans la pâte et lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
- Après chaque essai, conserver l'échantillon dans l'eau dans une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$;
- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (10 à 15 min) jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$;
- Noter le temps de début de prise ;
- Pour mesurer le temps de fin de prise, il faut retourner le moule tronconique et remplacer l'aiguille de début de prise par celle de fin de prise (accessoire annulaire sur l'aiguille) ;
- Noter le temps de fin de prise lorsque l'enfoncement de l'aiguille atteint 0.5mm.

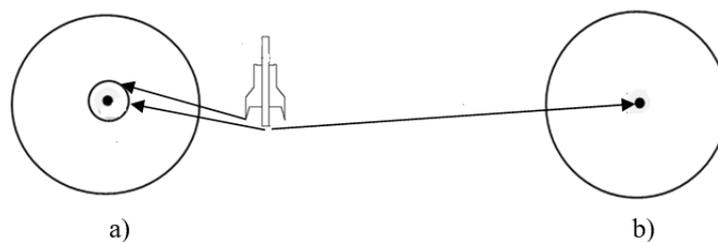


Figure I.12- a) Le temps de fin de prise non atteint et b) Le temps de fin de prise est atteint.



I.2.4 Evaluation

❖ TP-Test 1

Un groupe d'étudiants a mené un essai de consistance sur un ciment d'utilisation courante. Les valeurs obtenues d'enfoncement de la sonde en fonction de la quantité d'eau utilisée sont résumées dans le tableau ci-dessous :

E/C	0.21	0.26	0.31	0.36
Enfoncement d (mm)	38	32	10.5	2

1- Quel est le but de l'essai ?

2-Reportez les points représentés dans le tableau et déduire le rapport E/C idéale.

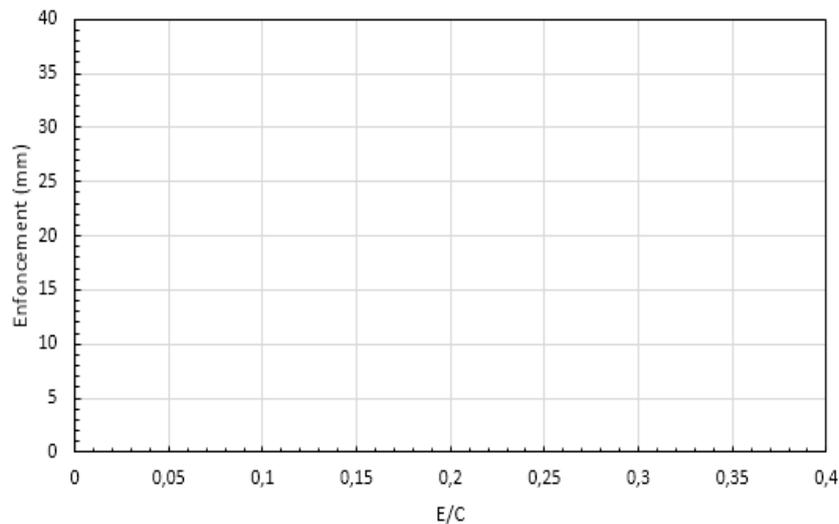


Figure Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C

3-Pourquoi mesure on mesure le temps de début de prise ?

4-Quelle est la différence entre le début de prise et le temps de prise ciment ?

5-Comment connaitre le durcissement de la pâte de la pâte de ciment ?

6-Les conditions climatiques influent sur la prise et le durcissement du béton. En effet, la réaction d'hydratation est fonction des températures atmosphériques. La prise et le durcissement du béton sont Lors de températures élevées et en cas de températures froides.



1-Le but de l'essai est de déterminer la quantité d'eau optimale (consistance normale) pour une pâte de ciment.

2- Le rapport E/C qui correspond à une consistance normale ($d=6\pm 1\text{mm}$) est égal à 0.335. Sachant que la quantité de ciment utilisée dans l'essai est 500g, donc la quantité d'eau est $E=167.5\text{g}$.

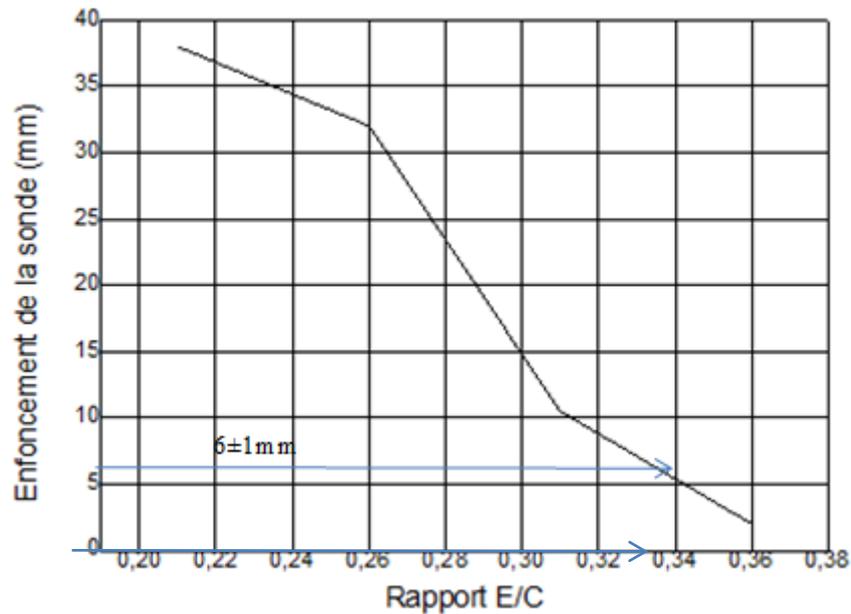


Figure- Evolution de la consistance de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C

- 3- On mesure le temps de début de prise pour prendre une idée sur le temps de malaxage, de transport et de la mise en œuvre du béton et/ou mortier.
- 4- La différence entre le temps de début et de fin de prise est que le temps de début de prise (TDP) correspond à un enfoncement de la sonde $d=4\pm 1$ mm et le temps de fin de prise (TFP) est lorsque l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte de ciment (moule renversé).
- 5- Le durcissement de la pâte de ciment est un phénomène de cristallisation (état fluide vers un état solide) en raison de l'hydratation.

❖ TP-Test 2

- 1-A quoi sert l'appareil de Vicat ?
- 2- Quels sont les paramètres qui retardent le temps de début de prise du ciment ?

❖ TP-Test 3

1-L'essai de consistance d'une pâte de ciment nous a donné les résultats suivants :

Masse de l'eau (g)	125	145	139	135
Enfoncement d (mm)	35	2	4	7

- 2-Quelle est la masse de ciment généralement utilisée dans cet essai ?
- 3-Tracer la courbe enfoncement de la sonde en fonction du rapport E/C.
- 4-Déterminer la masse exacte de l'eau qui conduit à une consistance normale (utiliser un graphique).



I.2.5 Travail expérimental

On vous demande d'effectuer une série d'essai sur des ciments anhydres pour déterminer la quantité d'eau nécessaire afin d'obtenir la consistance normalisée ($d=6\text{mm}\pm 1$) et le temps de

prise correspondant pour chaque type de ciment.

Résultats de consistance -ciment CEMII 42.5

Type de ciment	Température (° C)	Masse de l'eau (g)	E/C	C/E	d (mm)
CEMII42.5					

Résultats de consistance -ciment CEMII 32.5

Type de ciment	Température (° C)	Masse de l'eau (g)	E/C	C/E	d (mm)
CEMII32.5					

Résultats de consistance -ciment blanc CEMI 52.5

Type de ciment	Température (° C)	Masse de l'eau (g)	E/C	C/E	d (mm)
CEMI 52.5					



On demande pour chaque groupe de :

1. Tracez le graphe d en fonction de C/E.
2. Trouvez le rapport C/E et/ou E/C idéal.
3. Analysez les résultats et concluez.
4. Tracer la courbe de l'enfoncement de l'aiguille de Vicat en fonction du temps.
5. Déterminer l'influence des adjuvants sur le temps de prise de ces types de ciment.

Temps (min)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
Enfoncement d (mm)											

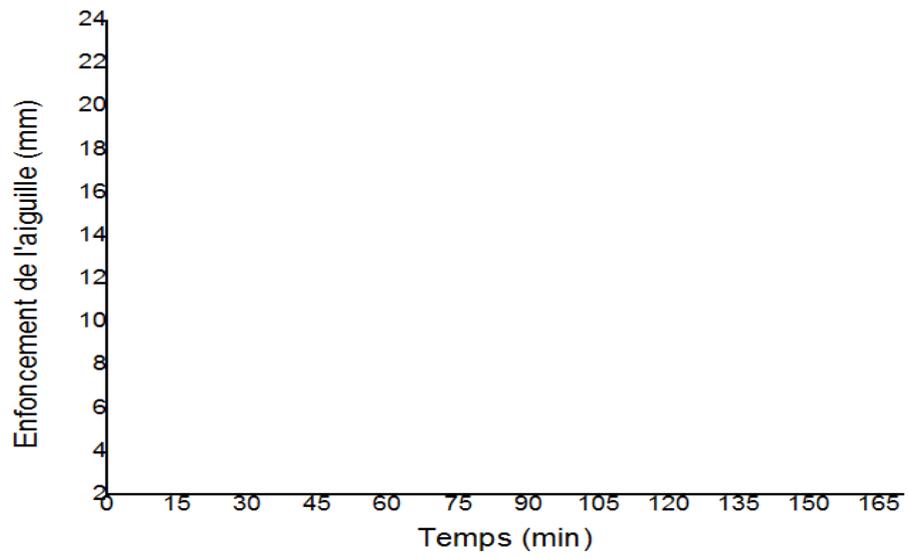


Figure- Evolution de la prise de la pâte de ciment en fonction du temps

I.3 Mesure de la granulométrie laser des particules de ciment

La qualité des différents types de ciment (produit fini) dépend majoritairement de la distribution de la taille des grains résultants de la finesse de broyage. Lorsque la composition chimique du ciment est invariable, seule la finesse de mouture détermine le degré de résistance c'est-à-dire plus le degré de finesse est élevé, plus les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont améliorées. Etant donné que lors de la fabrication du ciment, le broyage représente environ la moitié du coût de production. Pour éviter le broyage excessif du ciment, il existe un essai rapide qui s'appelle test granulométrie laser qui s'applique sur des petites quantités de ciment qui nous permet de connaître la distribution de taille des particules sur la base d'un modèle sphérique équivalent en volume. En effet, la qualité de broyage, le contenu fin trop élevé ou soit au laboratoire soit sur la ligne de production trop variable allant de quelques centaines de nanomètres (nm) à plusieurs millimètres (mm) sont détectés de manière fiable et rapide. Avec une puissante dispersion à sec (théorie de diffusion de la lumière), la diffraction laser offre en quelques secondes une sensibilité inégalée et une grande reproductibilité sur l'ensemble de la gamme de tailles de particules de ciment.



But de l'essai

Les principales raisons du succès de cette technique analytique résident dans :

- Sa large plage dynamique (du submicronique au millimètre)
- Sa mesure rapide
- Sa répétabilité
- Sa réaction instantanée
- Sa cadence de mesure élevée
- L'absence de calibration



Principe de l'essai

Le principe de l'essai consiste à évaluer les distributions granulométriques des particules en mesurant la variation angulaire de l'intensité de lumière diffusée lorsqu'un faisceau laser traverse un échantillon de particules de ciment. Les grosses particules diffusent la lumière à de petits angles par rapport au faisceau laser et les petites particules diffusent la lumière à des angles supérieurs. Les données relatives à l'intensité diffusée en fonction de l'angle sont analysées pour calculer la taille des particules selon théorie de Mie. La taille des particules représente le diamètre de la sphère équivalente ayant même volume que la particule.



Mode opératoire

- Introduire une petite quantité de ciment dans la trémie de l'appareil ;
- Régler le vernier entre 0.01 à 3500 μ m. L'appareil déclenche automatiquement les mesures.
- Afin de garantir des mesures représentatives, les mesures continuent jusqu'à ce que l'échantillon s'épuise.

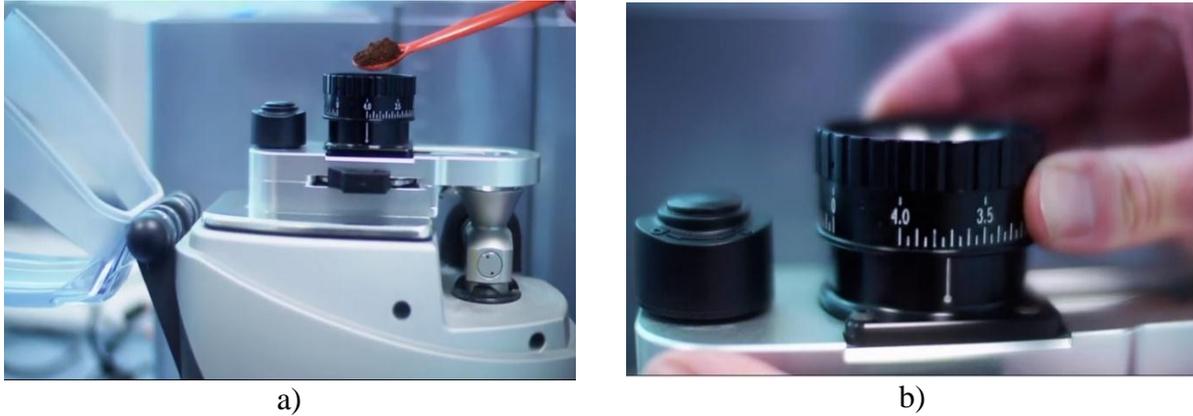


Figure 1.13- a) Introduction du ciment dans la trémie et b) réglage du vernier pour une distribution de taille des particules

I.3.1 Calcul et représentation de la taille de particules de ciment

Pour pouvoir représenter les résultats de mesures de granulométrie (Figures I.4 et I.5) [13] il faut au préalable calculer :

$$\text{Fraction relative} = \frac{\text{Masse de particule recueillie sur le tamis}}{\text{Masse totale de l'échantillon}} \quad (\text{Equ.I.5})$$

Diamètre le plus fréquent d_f

$$\text{Diamètre moyen arithmétique } d_a \quad d_a = \sum_i f_i \cdot d_i \quad (\text{Equ.I.6})$$

$$\text{Diamètre moyen géométrique } d_g \quad d_g = \sqrt[\prod_i (d_i)^{f_i}] = \exp \left(\sum_i f_i \cdot \ln(d_i) \right) \quad (\text{Equ.I.7})$$

$$\text{Diamètre moyen harmonique } D_h \quad d_h = \left(\sum_i \frac{f_i}{d_i} \right)^{-1} \quad (\text{Equ.I.8})$$

Diamètre médian d_{50}

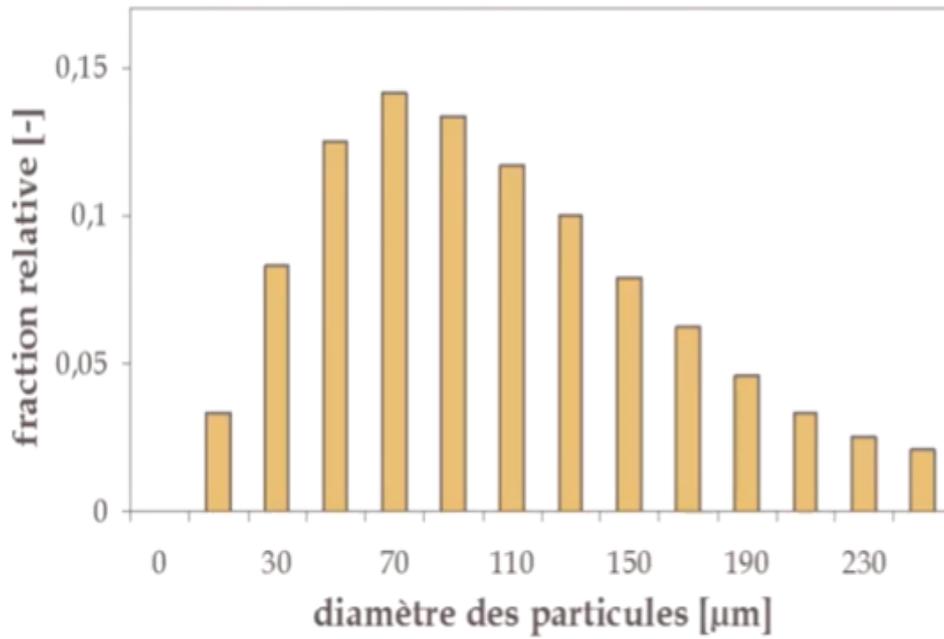


Figure I.14- Résultats de mesures de granulométrie laser sur un ciment (modèle1)

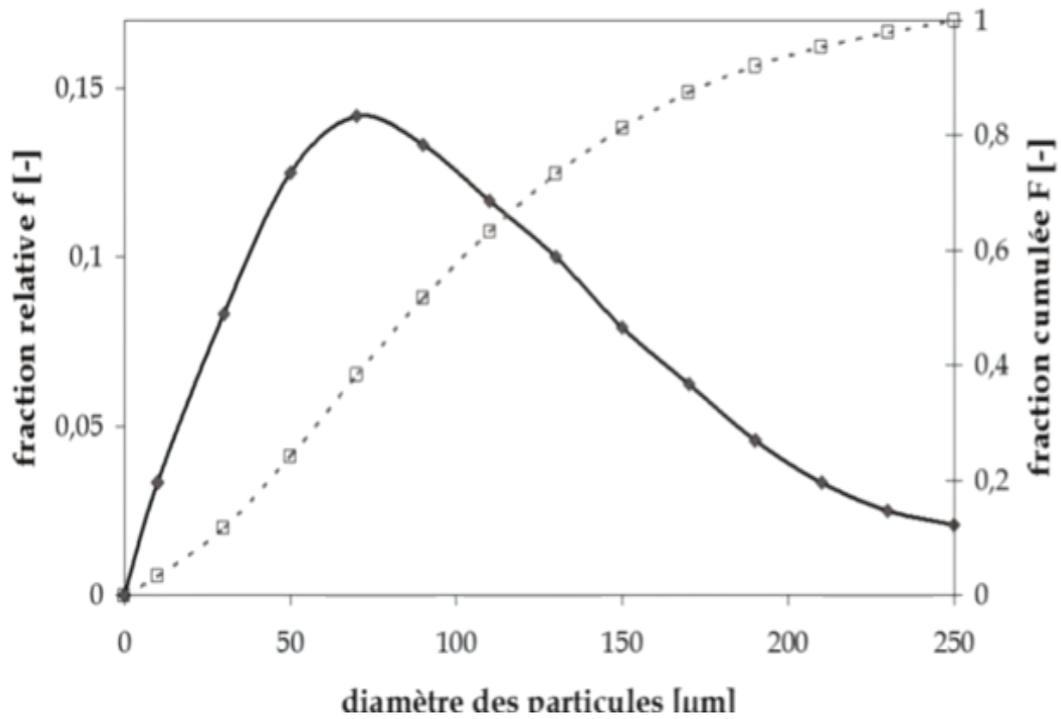


Figure I.15- Résultats de mesures de granulométrie laser sur un ciment (modèle2)



I.3.2 Evaluation

❖ TP-Test 1

L'analyse granulométrique effectuée par l'essai de la diffraction de lumière (granulométrie laser) sur cinq types de ciment est représentée sur la Figures I.16 [14].

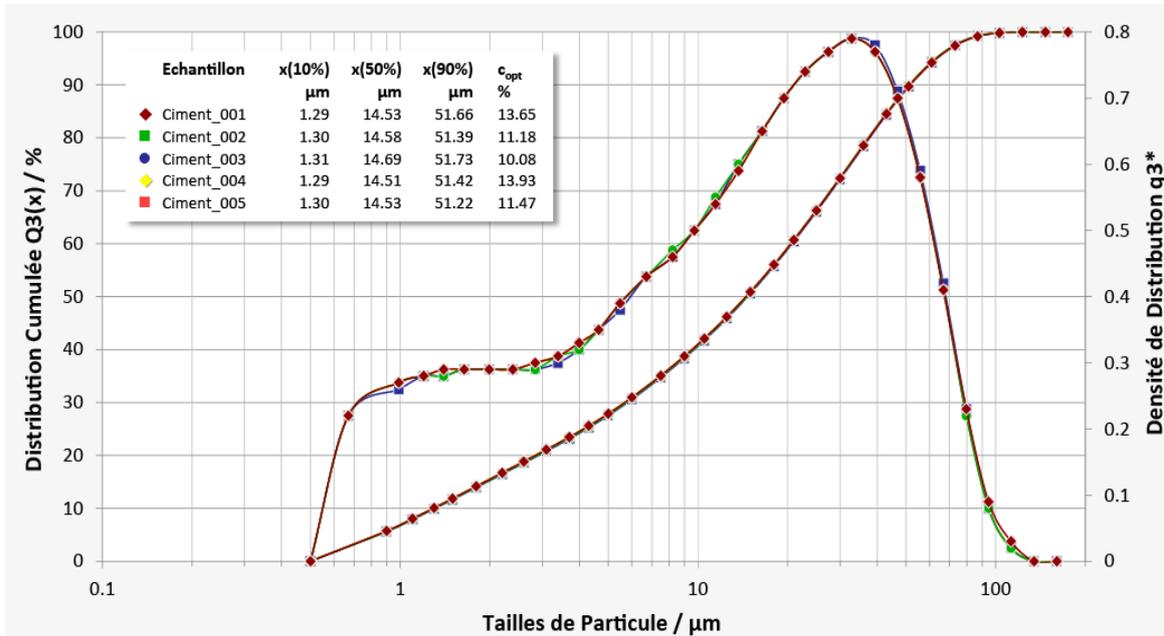


Figure I.16-Distribution de la taille des grains du ciment

On vous demande de calculer le d_{50} et le d_{80} pour chaque type de ciment étudié.



Travail Expérimental

L'analyse granulométrique d'un ciment CEMII 42.5 par diffraction laser nous a donné les résultats mentionnés dans le tableau suivant :

Taille des particules de ciment (µm)	Refus cumulé (%)
212	0.15
90	3.50
45	22.30
40	26.50
32	35.70
25	45.60
20	53.70
15	62.30
10	70.65
5	82.40
4	85.50
3	90.00
0	100.00

On vous demande de :

1. Tracer la courbe granulométrique du ciment étudié.
2. Interpréter les résultats.
3. calculer le d_{50} et le d_{80} pour chaque type de ciment.

I.4 Perte au feu

La perte au feu (PAF) ou LOI (loss on ignition en anglais) des liants hydrauliques est la perte de masse qui résulte d'un fort échauffement de ses poudres jusqu'à ce que leurs masses cessent de changer (l'eau et CO_2 se disparaissent de l'échantillon)



Principe

Pour effectuer cet essai, on prélève une quantité de $1,00 \pm 0,05$ g de ciment étudié et on le verse dans un creuset en platine et on l'introduit à l'intérieur d'un four à une température de $950 \pm 25^\circ\text{C}$ pendant 15 minutes.



Figure 1.17- Four pour la calcination des liants

Lorsque l'échantillon est refroidi on mesure la perte au feu qui est simplement la différence de masse de l'échantillon avant et après calcination exprimée en pourcentage, selon le protocole de la norme EN 196-2. La perte au feu est donc simplement la différence de masse:

$$\text{Perte au feu (\%)} = 100 \times (M_0 - M_1) / M_0.$$

(Equ.I.9)

Avec,

M_0 : masse initiale (g).

M_1 : masse finale (g).



Remarque

La perte due à l'humidité et au dioxyde de carbone entraîne une perte de poids qui ne doit pas dépasser 5% pour tous les liants.



I.4.1 Application

Une farine d'alimentation d'un four contient 78.5 % de CaCO_3 , 1.2 % de MgCO_3 et 0.4 % combiné comme eau de cristallisation et matières organiques. On vous demande de calculer la perte au feu de cette farine.



La perte au feu de cette farine est composée du CO_2 qui se dégage des carbonates (CaCO_3 et

MgCO₃), de l'eau combinée et des matières organiques

CO₂ :



$$\text{CO}_2 \text{ du CaCO}_3 = 78.5 \times 44 / 100 = 34.54 \%$$



$$\text{CO}_2 \text{ du MgCO}_3 = 1.2 \times 44 / 84 = 0.63 \%$$

Eau combinée, matières organiques 0.4 %

$$\text{Perte au feu} = 34.54 + 0.63 + 0.4 = 35.57 \%$$



I.4.2 Travail expérimental

On vous demande de déterminer au laboratoire la perte au feu (PAF) pour les trois types de ciment disponibles au laboratoire à savoir CEM II 42.5, CEMII32.5 et le ciment blanc CEM I52.5.

Groupe 1	Groupe2	Groupe3
CEM II 42.5	CEM II32.5	CEMI 52.5



Chaque groupe doit remettre un compte rendu qui comporte :

- ✓ Le but de l'essai
- ✓ Le matériel utilisé
- ✓ Les résultats
- ✓ Conclusion

I.5 Mesure de la surface spécifique (finesse) de ciment

Les ciments sont des poudres finement broyées. La finesse est une propriété étroitement liée à l'hydratation. En effet, plus la finesse du ciment est grande, la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes. La finesse d'un ciment est exprimée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. L'essai est gouverné par la norme **NA 231(NF EN 196-6)[15]**. Suivant le type de ciment, cette valeur varie entre 2 800 et 5 000 cm²/g. La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique est la perméabilité à l'air ' Méthode de R.L Blaine'



But

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment.



Principe

L'essai consiste à calculer le débit d'air susceptible de passer à travers une poudre de ciment anhydre. En effet, plus la surface massique de la poudre de ciment est importante, plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.



Matériel utilisé

Dans cet essai, on utilise le Perméabilimètre de Blaine .



Figure 1.18- Perméabilimètre de Blaine
(shop.proviteq.com)

L'appareil est doté des éléments suivants :

- Un bâti support ;
- Un tube en verre en U avec robinet et repères de niveau ;
- Une cellule de mesure complète en inox avec disque perforé et piston ;
- Un entonnoir de remplissage ;
- Un flacon de 250 ml de liquide manométrique ;
- Une poire de dépression ;
- Un pack de 1000 disques de papier filtre ;
- Un goupillon.



Mode opératoire

On remplit une cellule en inox par une masse de ciment légèrement comprimée jusqu'à l'aboutissement à une couche de hauteur et de section bien définie. Ensuite, on crée une différence de pression d'air entre les deux faces de la capsule. L'air traverse la poudre de ciment et l'équilibre des pressions tend à se rétablir.

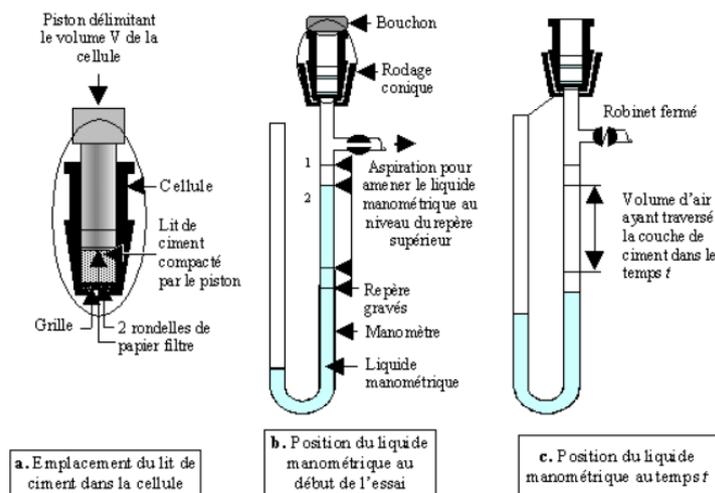


Figure I.19- Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine

On peut calculer la surface spécifique du ciment d'après le temps nécessaire à une diminution déterminée de la différence de pression par la relation suivante :

$$S_m = K_S \frac{\sqrt[3]{\varepsilon^3 \cdot \sqrt{t}}}{\rho_{abs.(1-\varepsilon)} \cdot \sqrt{n}} \quad (\text{Equ.I.10})$$

Où,

K_S est la constante de l'appareil à déterminer à partir d'un échantillon de ciment étalon.
 ρ_{abs} est la masse volumique absolue du ciment (Kg/m^3).

η est la viscosité de l'aire à la température de l'essai (pas.s).
 t : temps de passage de l'aire au travers de la couche de ciment (s).



I.5.1 Evaluation

Peut-on calculer la finesse de Blaine des additions minérales (filler calcaire, pouzzolane naturelle, etc....) via le Perméabilimètre de Blaine de ciment ?



...En effet, cependant; il faut se procurer des étalons des différentes additions minérales.



I.5.2 Travail expérimental

On vous demande de prendre deux types de ciment à savoir un CEMII 42.5 et un ciment blanc CEMII 42.5.

1. Déterminer la finesse de mouture de chaque type de ciment.
2. Commenter les résultats obtenus.

I.6 Les techniques de diffraction des rayons X sur poudre : cas du ciment

L'analyse des ciments par la spectrométrie de fluorescence des rayons X est gouvernée par la norme NA 5044(P 15-467: 1985) [16] La diffractométrie des rayons X est une technique non destructive qui repose sur l'analyse physico-chimique, qualitative et quantitative pour une large variété d'échantillons cristallins.



Figure I.20- Diffractogramme des rayons X sur poudres

Cette technique permet de déterminer la nature de chaque phase cristalline présente dans un échantillon de poudre. Un diffractogramme peut donc être considéré comme une empreinte digitale d'une phase cristalline.

I.6.1 Poudres cristallines

Une poudre est un ensemble de microcristaux présentant idéalement toutes les orientations cristallines possibles. Il en résulte que l'espace réciproque observé pour un monocristal est projeté selon une seule dimension.



Principe

La diffraction des rayons X (DRX) repose d'une part sur l'enregistrement d'un diffractogramme de l'intensité des pics détectés en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau. Et de l'autre part, sur l'analyse des maxima de ce diagramme qui permet de caractériser les cristallites présentes dans la poudre (la taille, le pourcentage de matériau sous forme cristalline ou amorphe, . . . etc) à partir de la position des pics (analyse qualitative, identification de phases cristallines présentes) et de la largeur des pics (taille et forme des cristallites, contraintes internes). Il est à noter que l'image de diffraction d'une poudre formée

d'une phase cristalline est constituée de cercles spécifiques de la phase cristalline.

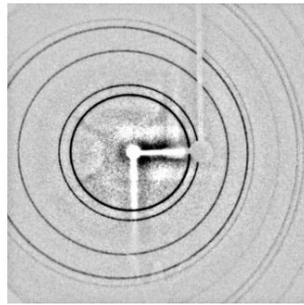


Figure I.21-Résultat obtenu après le bombardement d'une poudre cristalline par un faisceau de rayons X



Préparation de l'échantillon

La préparation de la poudre comporte les étapes illustrées dans les figures suivantes



Figure I.22-Broyage de la poudre



Figure I.23-Préparation de la pastille



Déroulement de l'analyse

Une fois la pastille a été préparée, elle doit être insérée dans la place spécifique du DRX comme le montre les figures 5 et 6.



Figure I.24-Insertion de la pastille dans le DRX

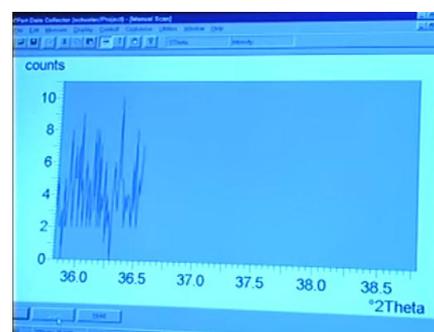


Figure I.25-Le DRX en marche

I.6.2 Identification de phases

Lorsque le diagramme est obtenu, on compare les positions et les intensités des pics observés avec ceux de la base de données se trouvant sur un fichier nommé « Powder Diffraction File » qui contient plus de 600.000 diagrammes de référence. Donc, l'opérateur peut aisément vérifier un résultat de synthèse (bonne phase cristalline, présence d'impuretés,...).

❖ L'identification des phases minéralogiques du clinker selon BOGUE

D'après la composition chimique, la formule de BOGUE donne, à titre d'exemple, pour un clinker les relations suivantes:

$$C_3S = 4.071C - 7.602S - 6.719A - 1.430F \quad (40 < 60 < 70) \quad (\text{Equ.I.11})$$

$$C_2S = 8.602S + 5.068A + 1.079F - 3.070C \quad (0 < 15 < 30) \quad (\text{Equ.I.12})$$

$$C_3A = 2.650A - 1.692F \quad (2 < 8 < 15) \quad (\text{Equ.I.13})$$

$$C_4AF = 3.043F \quad (\text{Equ.I.14})$$

❖ Allures des pics caractéristiques des phases majeures du clinker par DRX

Les phases majeures identifiées par DRX dans le clinker lors du bombardement par les rayons X, sont le C_3S (alite), le C_2S (bélite), le C_3A (alumine tricalcique) et le C_4AF (brownmillerite). En outre, les phases identifiées sont la calcite ($CaCO_3$), la chaux libre (CaO libre) et le périclase (MgO). Selon les travaux de Taylor 1990, les allures caractéristiques des pics d'alite (A), Bélite (B) et Célite (C), obtenus à partir d'un diffractogramme de clinker sont représentés dans la I.26[17].

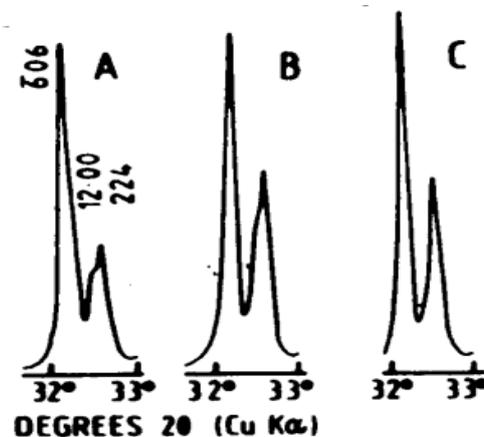


Figure I.26- Allures des pics caractéristiques des alites M3 (A), M1+M3 (B), M1 (C) dans des diffractogrammes de clinkers (radiation $CuK\alpha$)



I.6.3 Interprétation d'un spectre DRX sur une poudre de clinker anhydre

Le graphe représenté sur la Figure 8[18], nous montre un spectre de rayons X d'un clinker type. En effet, nous constatons la présence des raies des différentes phases c'est-à-dire le C_3S (Alite), le C_2S (Bélite), le C_4AF (brownmillerite) et enfin le C_3A (alumine tricalcique). En outre, les raies fortes de l'alite se superposent aux raies de la bélite dans la majeure partie du

spectre.

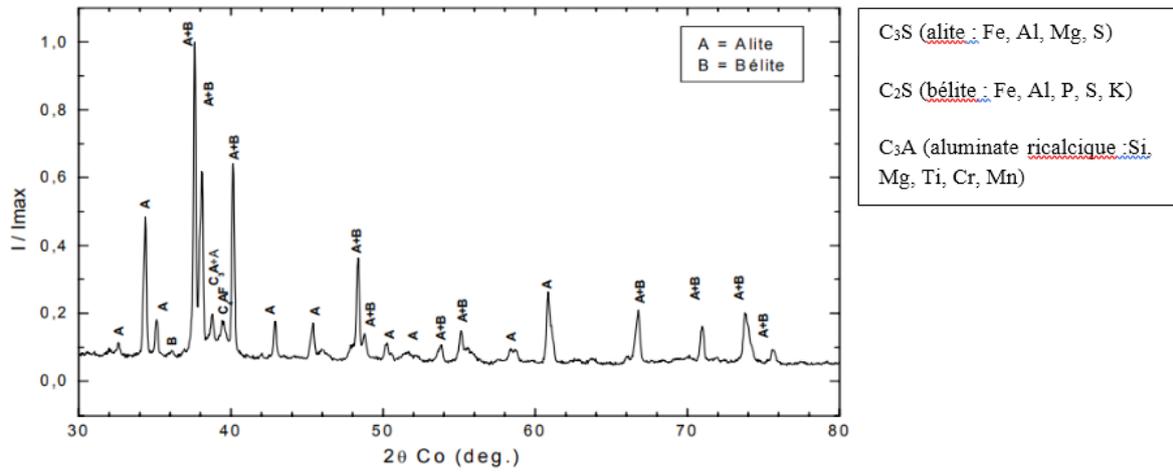


Figure I.27- Spectre de rayon X type clinker

I.7 Mesure de la résistance mécanique du mortier normal

De nos jours, une large gamme de ciment est mise à la disposition de l'utilisateur. En effet, un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. Les exigences climatiques et environnementales, la résistance à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus adéquat. Pour faire un choix judicieux du type de ciment, il est primordial de connaître les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments prévus par la normalisation.



But

Il s'agit d'évaluer la qualité du mortier produit.



Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier la résistance mécanique (flexion et compression) d'éprouvettes de mortier normal. Dans ce type de mortier, sauf le type de liant qui change car la résistance du mortier est étroitement liée à la résistance du liant utilisé.

I.7.1 Résistance normale

On entend dire par la résistance normale pour un liant donné, c'est la résistance mesurée à l'âge de 28 jours selon la norme **NA 234 (EN 196-1) [5]**. En effet, cette résistance définit la classe vraie du ciment (classe commerciale).

I.7.2 Mortier normal

Le mortier normal est un mortier qui se prépare généralement dans les cimenteries. Il sert à définir certaines caractéristiques d'un liant et notamment sa résistance, avant d'être commercialisé. Il contient 450g de ciment, un sac de sable (sable de Fontaine Blau) contenant $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ et une quantité d'eau de 225g.



Matériel utilisé

- Balance de précision (précision 1 g près),
- Malaxeur normalisé muni de deux vitesses de rotation (vitesse rapide et lente),
- Moules prismatiques de dimensions $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$,
- Appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 sec,
- Une presse hydraulique



Préparation du mélange de mortier normal

1. Introduire la quantité d'eau dans la cuve du malaxeur ;
2. Verser doucement le ciment anhydre dans la cuve et mettre en marche le malaxeur à vitesse lente pendant 30s.
3. Introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes.
4. Mettre le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires.



Figure 1.28- Malaxeur à mortier

5. Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient.
6. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

Tableau 1.7- séquences de malaxage du mortier

Opérations	Introduire l'eau	Introduire le ciment		Introduire le sable	Raclage		
Durée			30s	30s	15s	1min15s	60s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide

I.7.3 Fabrication des éprouvettes

1. Graisser les moules prismatiques (4cm×4cm×16 cm) et couler le mortier normal.
2. Compacter le mortier et araser.
3. Conserver les moules dans la température ambiante du laboratoire et les recouvrir par une toile de jute humide.
4. Après 24 heures, les échantillons doivent être démoulés et conservés jusqu'à la période de l'essai dans l'eau saturée de chaux (20 ± 1°C).



I.7.4 Essai de traction par flexion

1. Essayer les éprouvettes et les peser ;
2. Placer les éprouvettes au contact des appuis du dispositif conçu pour l'essai de traction (voir figure) en respectant la norme ;
3. Appliquer progressivement la force jusqu'à la rupture de l'éprouvette ;
4. Récupérer les deux moitiés de l'éprouvette pour l'essai de compression ;
5. La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M.v}{I} \quad (\text{Equ.I.15})$$



Figure I.29- Essai de traction par flexion

Avec :

M : Moment de flexion maximal : $M = \frac{f.l}{4}$

I : Moment d'inertie de la section transversale : $I = \frac{a^4}{12}$

v : La distance de la fibre inférieure la plus éloignée : $v = \frac{a}{1}$

La résistance à la traction par flexion est calculée par la formule suivante

$$\sigma_t = \frac{1.5.f.l}{a^3} \quad (\text{Equ. I.16})$$

On affecte un coefficient de 0,6 aux valeurs trouvées pour tenir compte de la plastification du mortier la résistance à la traction devient :

$$\sigma_t = \frac{0.9.f.l}{a^3} \quad (\text{Equ.I.17})$$



I.7.5 Essai de compression

1. Remplacer le dispositif conçu pour l'essai de traction avec celui destiné à la compression ;



Figure I.30- Essai de compression

2. Placer le demi-prisme obtenu lors de l'essai de traction entre deux plaques métalliques de dimensions 4cm×4cm ;
3. Appliquer progressivement la force de compression jusqu'à la rupture de l'échantillon ;
4. Appliquer la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{f}{a^2} \quad (\text{Equ.I.18})$$

Ou,

f est la force de rupture en kN et a la section de l'échantillon (a=40mm).

Nb : Si l'un des 6 résultats diffère de $\pm 10\%$ de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants.



I.7.6 Application

Déterminer la résistance en traction et en compression d'un ciment Portland à l'âge de 28 jours effectué sur éprouvette de mortier de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm, sachant que les valeurs affichées sont 2100 N en flexion et 47000N en compression.

$$R_f = 9.P/2.a^2 \quad \text{et} \quad R_c = F_c/A$$

Calculer la valeur de la résistance en compression et en flexion.



La résistance à la flexion

$$R_f = 9.P/2.a^2 = 9(2100)/2.(40)^2 = 5.9 \text{ MPa}$$

La résistance à la compression

$$R_c = F_c/A = 47000/1600 = 29.375 \text{ MPa}$$



I.7.7 Travail expérimental

Vous avez à votre disposition trois types de ciments à savoir un ciment CEMII/A-L 42.5N – GICA, un ciment Matine CEM II/A-L 42,5 N-Lafarge et un ciment Chamil CEMII/B-L 32.5N.



Pour chaque groupe, il est demandé de :

1. Reporter toutes les mesures obtenues au cours du TP sur le model des tableaux ci – dessous (Tableau 1,2,3,4 et 5)..
2. Commenter les résultats obtenus et comparer ces derniers avec ceux rapportés dans la fiche technique fournie par le fabricant.

Tableau1 : Résultats de résistance en flexion

Echantillon	Age	Force de rupture (kN)	Rf (MPa)
CEM II /A-L 42.5 Gica	2	.....	.....
	2	.....	.....
	2	.....	.....
		Moyenne	Moyenne

Tableau 2: Résultats de résistance en flexion

Echantillon	Age	Force de rupture (kN)	Rf (MPa)
CEM II /A-L 42.5 Gica	7	.....	.....
	7	.....	.....
	7	.....	.....
		Moyenne	Moyenne

Tableau 3 : Résultats de résistance en flexion

Echantillon	Age	Force de rupture (kN)	Rf (MPa)
CEM II /A-L 42.5 Gica	28	.....	.....
	28	.....	.....
	28	.....	.....
		Moyenne	Moyenne

Tableau 4: Résultats de résistance en compression

Echantillon	Age	Force de rupture (kN)	Rc (MPa)
CEM II /A-L 42.5 Gica	2	.....	.....
	2	.....	.....
	2	.....	.....
		Moyenne	Moyenne

Tableau : Résultats de résistance en compression

Echantillon	Age	Force de rupture (kN)	Rc (MPa)
CEM II /A-L 42.5 Gica	7	.....	.....
	7	.....	.....
	7	.....	.....
		Moyenne	Moyenne

Tableau : Résultats de résistance en compression

Echantillon	Age	Force de rupture (kN)	Rc (MPa)
CEM II /A-L 42.5 Gica	28	.....	.....
	28	.....	.....
	28	.....	.....
		Moyenne	Moyenne

Chapitre II Chaux hydraulique



II.1 Processus de fabrication de la chaux

La chaux est un liant obtenu par cuisson du calcaire (forte proportion de carbonate de calcium) dans des fours spéciaux à très haute température de 900 °C à 1100 °C (Figure II. 1) [19].

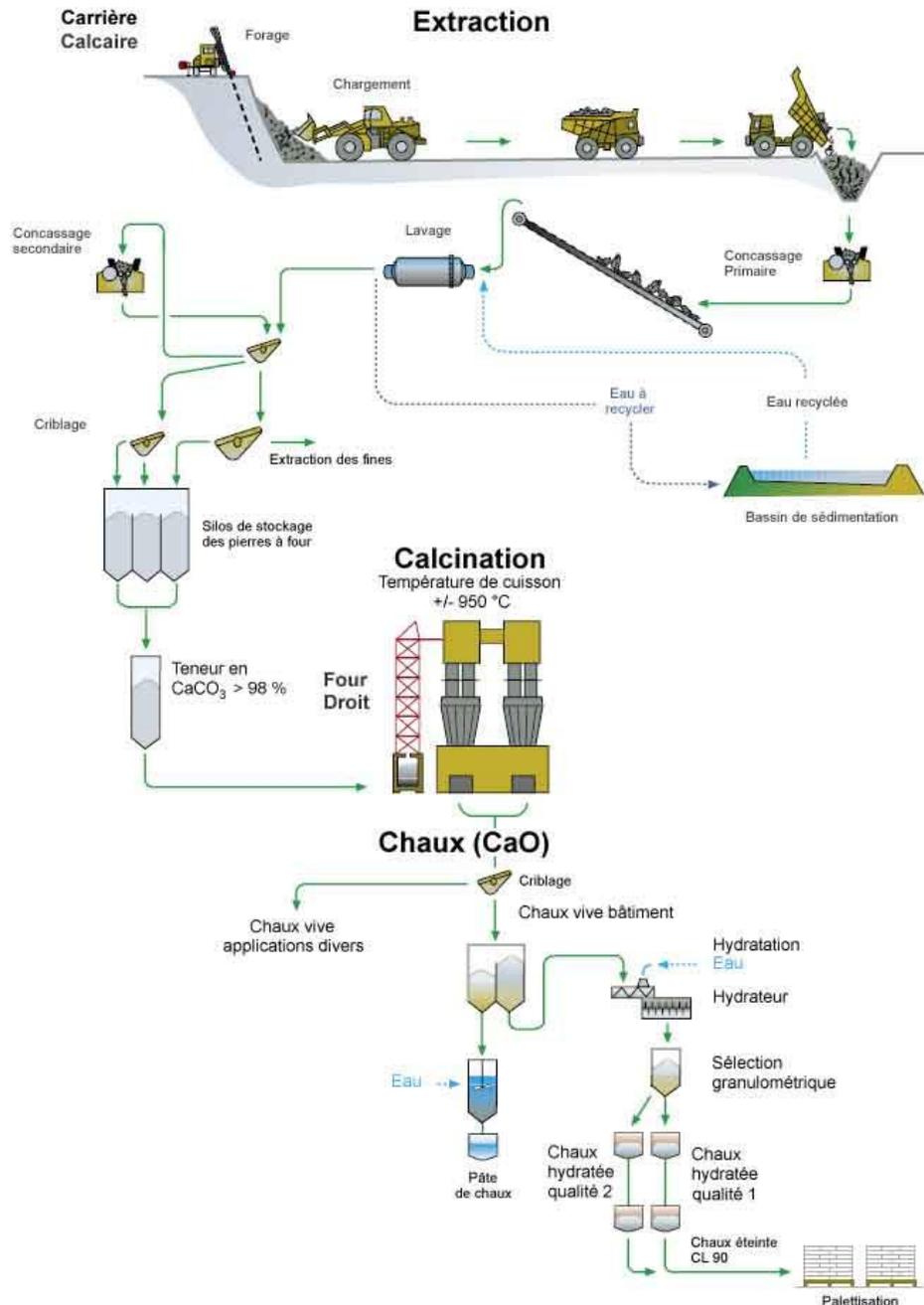
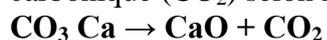


Figure II.1- Processus de fabrication de la chaux

Donc, cette température transforme le carbonate originel en oxyde de calcium et en gaz carbonique (CO₂) selon la réaction suivante:



(Equ.II.1)

L'oxyde de calcium, c'est la chaux vive (une base très corrosive). En effet, pour la rendre compatible, il est nécessaire de l'éteindre par hydratation (eau) après le broyage.

II.1.1 La chaux aérienne NA 5011 (NF EN 459-1) [20]

La chaux aérienne est le résultat d'une réaction chimique entre l'hydroxyde de calcium très pur et l'eau [21] selon l'équation suivante :

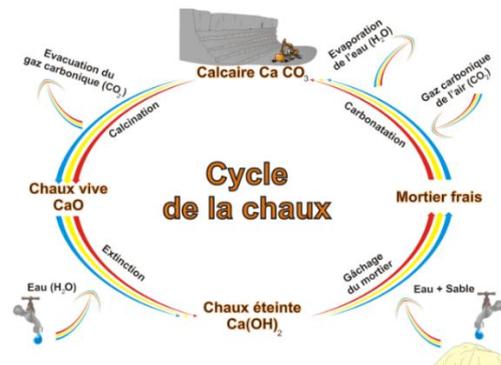


Figure II.2- Le cycle de la chaux

Les caractéristiques de la chaux sont gouvernées par le processus de fabrication et la quantité d'impuretés. En effet, une tolérance de 5% d'impuretés argileuse est tolérée. Elle ne durcit qu'au contact de l'air. Elle est calcique (CL-calcium lime) lorsqu'une grande partie du calcaire qui en est à l'origine est composée de carbonate de calcium (CaCO₃). Dolomitique (DL) lorsque la dolomie (CaMg [CO₃]₂) est prédominante dans sa composition.

II.1.2 La chaux hydraulique

La chaux hydraulique est moins pure en calcaire que la chaux aérienne. Ce type de chaux est issue de la cuisson du calcaire et de l'argile (5 - 20%) à une température avoisinante de 1200 °C. Le calcium se combine avec ces éléments pour former des silicates, des aluminates et des ferro-aluminates de calcium. Elle durcit d'abord au contact de l'eau puis à l'air. Elle peut être naturelle (NHL) et/ou artificielle (XHA). Elle est plutôt utilisée en maçonnerie.

II.1.3 Domaines d'application de la chaux

La chaux aérienne et la chaux hydraulique sont destinées au domaine de la construction. Cependant, leur domaine d'application, diffère d'un type à un autre. En effet, la chaux aérienne est utilisée comme mortier de rejointoiement des pierres, pour les enduits de finition intérieure mais aussi des peintures appréciées pour leur qualités bactéricides et antiseptiques. Cependant, la chaux hydraulique est utilisée pour constituer du mortier de maçonnerie (à hourder) ou pour réaliser des joints. Dans le commerce, on trouve 3 catégories de chaux hydraulique NHL, identifiées par des valeurs chiffrées 2, 3.5 et 5 dont la progression correspondant au niveau de dureté et de résistance du mortier. La chaux NHL 2 présente une basse hydraulicité elle est utilisée pour les enduits, la chaux NHL 3.5 présente une moyenne hydraulicité elle est utilisée dans la majorité des travaux et enfin la chaux NHL 5 présente une hydraulicité élevée elle est utilisée pour la maçonnerie.

II.2 Essai de consistance et de prise de la chaux hydraulique

II.2.1 Essai de consistance

La détermination de la consistance de la pâte de chaux pure a pour but d'évaluer la maniabilité, afin d'établir la meilleure consistance possible en fonction des applications caractéristiques (enduits, revêtements, maçonnerie, régularisation de surfaces, etc).



Matériel utilisé

Pour effectuer l'essai de consistance de la chaux hydraulique, on se sert du matériel suivant

- Balance
- Burette (50 ml)
- Plateau en verre
- Table à secousses



Mode opératoire (IS: 6932-Part 8-1973) [22]

Verser une quantité de 500g de chaux hydraulique dans une quantité d'eau égale et conservé pour trempage pendant 24 heures. Après 24 heures, la chaux est soigneusement mélangée à l'aide d'un malaxeur de laboratoire. La pâte de chaux ainsi obtenue est immédiatement placée dans le moule posé sur la surface de la table à secousses, en deux couches. En effet, chaque couche est compactée par 10 coups brefs de dame. Une fois, le moule rempli et arasé, il est soulevé et lâché d'une hauteur connue (15 chocs en 15 secondes), après avoir libéré l'éprouvette du moule. En effet, pour chaque mortier, trois mesures de consistance doivent être effectuées.

La consistance standard de la pâte de chaux doit avoir un diamètre d'étalement moyen de 11cm. Il est à noter que lorsque la consistance est trop rigide, plus d'eau est ajoutée, et si elle est trop humide, une petite partie de l'eau est retirée en plaçant le matériau pendant une courte période sur une surface absorbante propre.



Figure II.3- Table à secousses pour essai de consistance sur une pate pure de chaux hydraulique.



II.2.2 Evaluation

Dans le but de déterminer la consistance d'une pâte de chaux hydraulique, un opérateur a effectué trois essais via la table à secousses en utilisant 500g de chaux hydraulique NHL 3.5 et 500g d'eau. Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Essai	D ₁ (cm)	D ₂ (cm)	D _{moyen} (cm)
1	17.6	17.4	
2	16.8	17.0	
3	17.2	16.8	

On vous demande de

1. Complétez le tableau.
2. Commentez le résultat de consistance trouvé.



- 1- Le diamètre moyen pour chaque essai sur chaux

Essai	D ₁ (cm)	D ₂ (cm)	D _{moyen} (cm)
1	17.6	17.4	17.5
2	16.8	17.0	16.9
3	17.2	16.8	17

- 2- D'après les résultats de chaque essai, nous constatons que le diamètre d'étalement de la chaux est supérieur à 11 cm. Nous pouvons conclure que la chaux est trop humide.

II.2.3 Essais de prise sur la chaux hydraulique (IS:6932-Part 11-1983) [23]

L'essai consiste à déterminer le temps de prise de la chaux par l'appareil de Vicat.



Matériel utilisé

Pour effectuer l'essai de prise de la chaux hydraulique, on se sert du matériel suivant

- Balance
- Burette (50 ml)
- Plateau en verre
- Appareil de Vicat



Préparation de l'échantillon

Verser une quantité de 500g de chaux hydraulique dans une quantité d'eau égale et conservé pour trempage pendant 24 heures.



Procédure

Le moule tronconique est posé sur une plaque en verre ensuite rempli de la pâte de chaux et arasé.

II.2.4 Temps de début de prise

Le moule tronconique est placé sous la partie mobile (300g) de l'appareil de Vicat. L'aiguille est abaissée doucement pour entrer en contact avec la surface de la pâte, puis relâchée rapidement, lui permettant de pénétrer dans la masse de chaux. L'essai sera répété jusqu'à ce que l'enfoncement d soit égal à $5 \pm 0,5$ mm mesuré à partir du fond du moule. Il est à noter que le temps de début de prise ne doit pas être inférieur à 150 minutes.

❖ Temps de fin de prise

Pour mesurer le temps de fin de prise on remplace l'aiguille de début de prise par une aiguille de fin de prise constituée d'un embout annulaire. En effet, le temps de fin de prise est atteint lorsqu'on applique doucement l'aiguille sur la surface de la pâte, l'aiguille fait une empreinte sur la surface.



Remarque

Les résultats du temps de début et de fin de prise doivent être rapportés à cinq minutes près.



II.2.5 Applications

Un opérateur a effectué un essai une pâte de chaux pour déterminer le temps de début de prise. Les résultats trouvés sont les suivants :

35min, 63min, 96min, 120min et 156min

Quel est le bon résultat trouvé ?



La bonne réponse est 120 min.

II.3 Mesure de la stabilité de volume de la chaux hydraulique



But

L'essai consiste à déterminer la stabilité de volume (expansion) de la pâte pure de chaux hydraulique par la méthode de Le Chatelier.



Matériel utilisé

Pour effectuer cet essai on se sert du matériel suivant :

- Appareil Le-Chatelier
- Bouilloire Le-Chatelier



Figure II.4- Appareil Le-Chatelier



Figure II.5- Bouilloire Le-Chatelier



Préparation des échantillons (IS:6932-Part 9-1973) [24]

Pour préparer les échantillons, on procède de la manière suivante :

On pèse une quantité de chaux hydraulique et on la mélange avec un tiers de sa masse en ciment ordinaire et 4 fois sa masse en sable. Ensuite le tout est mélangé avec 12% en masse d'eau calculés sur le mélange sec.



Procédure

Pour effectuer l'essai de stabilité de volume pour la chaux hydraulique, on utilise trois moules Le-Chatelier (Figure). Avant de remplir les moules, on place une plaque en verre sous le moule.

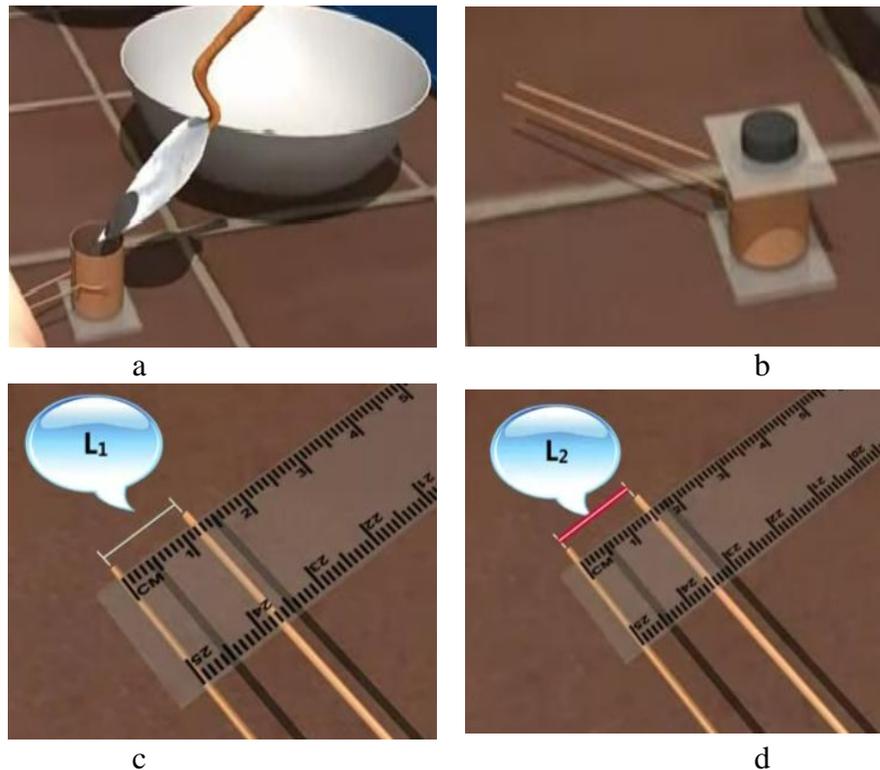


Figure II.6- Essai de stabilité de volume a) remplissage du moule, b) protection du moule, c) et d) mesure de distances entre points indicateurs

Le moule rempli de mortier est ensuite recouvert d'une autre plaque en verre, sur laquelle est placée une petite masse. Par la suite, les 3 moules sont laissés au repos pendant 1 heure. Après 1 heure, la distance séparant les points indicateurs des tiges sont mesurés et ces moules sont placés dans une armoire humide pendant une période de 48 heures. Après 48 heures, ils sont retirés de l'armoire et placés dans une bouilloire pendant une durée de 3 heures. À la fin de cette période, les moules sont retirés de la bouilloire ensuite laissés refroidir et la distance entre les points indicateurs est à nouveau mesurée



II.3.1 Calcul

La différence entre les deux mesures ($L_2 - L_1$) indique la stabilité de volume de la chaux. En effet, la norme exige que l'expansion aux aiguilles de Le-Châtelier, à chaud après 3 heures doit être inférieure à 3 mm.



II.3.2 Evaluation

Pour évaluer le taux de chaux dans un ciment, un essai de stabilité de volume à été mené via l'appareil Le-Chatelier. Les matériaux utilisés sont la chaux NHL5, le ciment Portland CEMII42.5 et le sable 0/3. Les résultats trouvés sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Echantillon	(L ₁) mm	(L ₂) mm	(L ₂ -L ₁) mm
Moule 1	1.3	2.2	--
Moule 2	1.1	1.9	--
Moule 3	1.3	2.1	--

1. Quel est le but de l'essai ?
2. Que signifie les valeurs L₁, L₂ et L₂-L₁ ?
3. Remplir le tableau.
4. Commentez les résultats.

II.4 Finesse de la chaux hydraulique par la méthode de tamisage à sec



But

L'essai a pour but de déterminer la finesse de la chaux par la méthode de tamisage à sec.



Matériel utilisé

- Tamis
- Etuve
- Balance précise



Préparation des échantillons (IS:6932-Part 4-1973) [25]

Avant de commencer l'essai, l'échantillon doit être séché au four à une température comprise entre 100⁰ C à 110⁰C.



Procédure

L'essai consiste à peser 100g de chaux et de la faire passer à travers une série de tamis au moyen de jet d'eau pendant une durée ne dépassant pas 30 minutes. Ensuite le refus obtenu sur chaque tamis doit être séché à 100±10⁰C jusqu'à masse constante et pesé.



II.4.1 Calcul

Le refus sur chaque tamis (%), le refus cumulé (%) et les fines (%) sont calculés comme suit :
Le refus sur chaque tamis = Masse de l'échantillon retenu dans chaque tamis / Masse totale de l'échantillon.

Le refus cumulé est calculé en ajoutant le refus sur chaque tamis comme une procédure cumulative.

Les fines (%) sont calculées en soustrayant le refus cumulé (%) de 100 %.

II.4.2 Détermination de la teneur en oxyde de calcium dans la chaux

L'oxyde de calcium (CaO, chaux vive) est obtenu par calcination à environ 900 °C des minéraux calcite ou aragonite de formule chimique CaCO₃ selon la réaction chimique ci-dessous.



Il a été constaté que lorsqu'on introduit 100 grammes de roche dans un four à une température d'environ 900 °C, on obtient seulement 56 grammes de chaux vive et le reste (44g de dioxyde de carbone) se dégage dans l'atmosphère [26].

Pour calculer la masse d'oxyde de calcium (chaux vive) obtenue on se réfère à la relation suivante:

$$n(\text{CaO})_{\text{obtenue}} = n(\text{CaCO}_3)_{\text{initial}} \quad (\text{Equ.II.5})$$

n , représente la quantité de matière de CaCO_3 présente au départ, s'exprime en mole. En outre, pour connaître les masses correspondantes, il faut utiliser la formule de passage suivante

$$n = \frac{m}{M} \quad (\text{Equ.II.6})$$

Avec,

m , la masse en gramme et M , la masse molaire moléculaire en g/mole. Par analogie, on peut écrire la relation (1) comme suit :

$$\frac{m(\text{CaO})_{\text{obtenue}}}{M(\text{CaO})} = \frac{m(\text{CaCO}_3)_{\text{initial}}}{M(\text{CaCO}_3)} \quad (\text{Equ.II.7})$$

Sachant que les masses molaires moléculaires de la chaux vive (CaO) ainsi que du carbonate de calcium (CaCO_3) sont respectivement égales à $M(\text{CaO}) = 56 \text{ g/mol}$ et $M(\text{CaCO}_3) = 100 \text{ g/mol}$ par conséquent la masse de la chaux vive peut être calculée par la relation suivante :

$$m(\text{CaO})_{\text{obtenue}} = m(\text{CaCO}_3)_{\text{initial}} \cdot \frac{56}{100} \quad (\text{Equ.II.8})$$



II.4.3 Evaluation

Dont le but de déterminer la teneur en oxyde de calcium d'une roche calcite contenant plus de 95% de CaCO_3 . Des fragments de cette roche ont été de masse constantes (100g) ont été calcinées avec des températures différentes comme présenté dans le tableau ci-dessous.

Température de calcination °C	$m(\text{CaCO}_3)_{\text{initial}}$	$m(\text{CaO})_{\text{obtenue}}$
900	100	--
950	100	--
1000	100	--
1100	100	--

On vous demande de :

1. Complétez le tableau.
2. Qu'est-ce que vous constatez ?

II.5 Essai de réactivité à l'extinction de la chaux



But

L'essai consiste à mélanger une quantité d'eau déminéralisée et de chaux dans un vase de type normalisé. Le mélange est ensuite agité à une vitesse de rotation définie par un agitateur muni d'une pale d'agitation spécifique. A l'aide d'un thermomètre de précision on mesure les variations de température dans le vase.



Figure II.7- Appareillage utilisé pour la mesure de la réactivité de la chaux



II.5.1 Mode opératoire NF EN 459-2 Août 2012[27]

L'essai consiste à suivre l'évolution du dégagement de chaleur issu de l'addition de 150 g de chaux vive à 600 g d'eau déminéralisée préalablement portée à une température de 20 °C, et ce dans un récipient isotherme. Le mélange est ensuite agité à une vitesse de rotation définie par un agitateur muni d'une pale d'agitation spécifique. A l'aide d'un thermomètre précis on mesure les variations de température dans récipient isotherme. Le temps mis par le mélange pour atteindre une température de 60 °C est appelé le t_{60} et est exprimé en minutes. Plus la chaux est réactive, plus ce délai est court.



II.5.2 Evaluation

Pour évaluer la réactivité d'une chaux vive, un essai a été mené au laboratoire.

Température (°C)	20	30	40	50	60
Temps (min)	--	--	--	--	--

1. Complétez le tableau ci-dessus.
2. Tracer le graphe de la température en fonction du temps.
3. Déterminer le temps que met le mélange pour atteindre une température de 60 °C (t_{60}).

II.6 Résistance en compression



But

L'essai consiste à évaluer la résistance en compression des mortiers de chaux hydraulique.



Matériel utilisé

- Balance
- Moules
- Machine de compression



Préparation des échantillons IS:6932-Partie 8-1973[23]

On pèse 500 g de chaux hydraulique ainsi qu'une quantité d'eau comprise entre 60 à 65 %. Le tout est mélangé pendant 5 minutes dans un malaxeur de laboratoire. Ensuite, on prend une quantité de pâte soit environ 350 g qui doit être mélangée avec du sable (636 g à 656 g) et malaxé pendant 10 minutes.



Mode opératoire

Pour effectuer l'essai de compression des mortiers de chaux, on coule les mortiers dans des moules cubiques de dimensions 5× 5× 5 cm. Par la suite les moules sont stockés dans une armoire à une température de 27 ± 20 °C et une humidité relative supérieure à 90% pendant 72 heures. Après 72 heures, les échantillons doivent être placés à la température ambiante du laboratoire, pendant 4 jours. Après cette période de cure, les échantillons sont immergés dans de l'eau de ville et laissés jusqu'à l'âge de 7 jours, les échantillons sont essuyés et testés dans une machine de compression à un taux de chargement de 15kg/min, pendant 14, 21 et 28 jours.

La résistance en compression des éprouvettes de mortier a été calculée comme la charge maximale divisée par la surface moyenne au milieu de l'éprouvette.



Remarque

Pour évaluer la résistance en flexion des mortiers, l'essai de flexion à trois points est souvent utilisé. En effet, des éprouvettes prismatiques confectionnées par le même mortier déjà utilisé pour l'essai de compression sont sujettes à une force verticale à la mi-distance de l'éprouvette. Il est à noter que les échantillons sont sujets aux mêmes conditions de cure citées précédemment. La résistance à la flexion est calculée à partir de la formule bien connue de la résistance à la flexion par un test de flexion en trois points.

$$\sigma = \frac{1.5.f.l}{b.d^2} \quad (\text{Equ.II.3})$$

Où, f est la charge maximale, l est la portée entre les deux appuis, b est la largeur et d est la hauteur de l'éprouvette à l'endroit de la rupture.



II.6.1 Evaluation

Afin d'évaluer les résistances mécaniques d'un mortier de chaux hydraulique NHL5 destiné à la restauration, des éprouvettes cubiques et prismatiques ont été confectionnées et stockées au laboratoire jusqu'à l'âge de l'essai (7, 28, 90 et 180 jours). Les résultats sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Age (jours)	7	28	90	180
Résistance en compression (MPa)	4.1	7.8	10.5	12.7
Résistance en flexion (MPa)	1.1	1.5	2.7	3.6

1. Quel est la différence entre la chaux aérienne et la chaux hydraulique ?
2. Que signifie la chaux NHL5 ?
3. Tracer les graphes de la résistance en compression et de la résistance en flexion.
4. Tracer le graphe de la résistance en flexion en fonction de la résistance en compression et déduire s'il existe une corrélation



1- La différence entre la chaux hydraulique et la chaux aérienne

Chaux hydraulique	Chaux aérienne
5-30% argile	Calcaire très pur
Moins plastique	Plastique
Prise plus rapide	Durci lentement au contact de l'air
Solide et résiste au chocs	Moins solide et moins résistante aux chocs
Utilisation en extérieur et en intérieur	Utilisation intérieur
Résiste bien aux intempéries	Ne résiste pas à l'humidité

2- la NHL 5 contient entre 14 % à 20 % de silice .

3- Résistance en compression

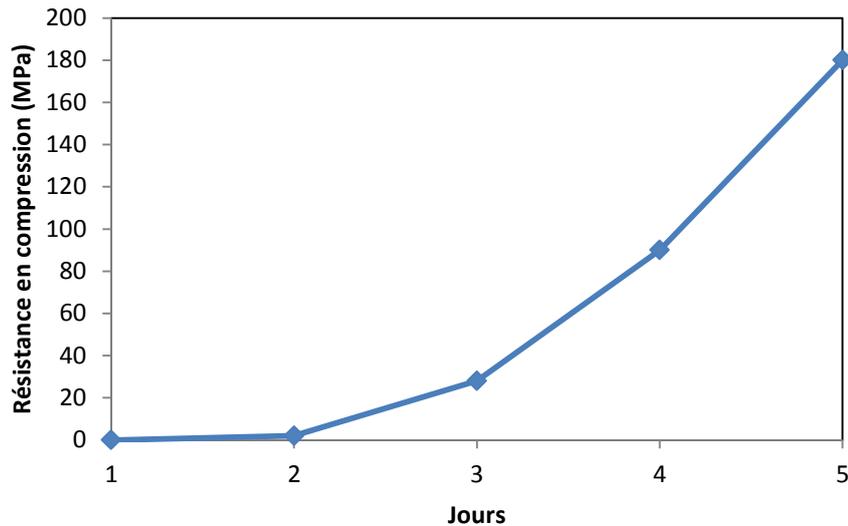


Figure 1- Résistance en compression en fonction de l'âge

4- Résistance en flexion

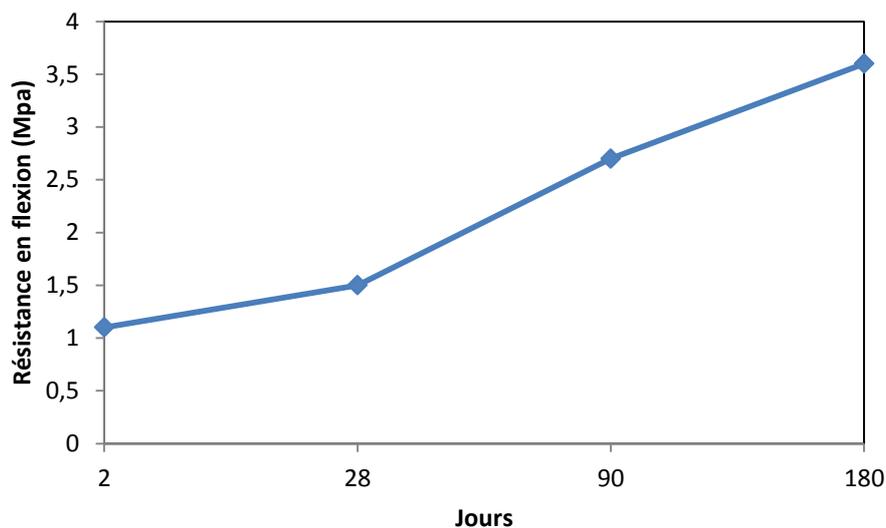


Figure 3- Résistance en flexion en fonction de l'âge

5-Corrélation

Nous constatons qu'il existe une bonne corrélation entre la résistance en traction et celle en compression avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.9222$. Lorsque la résistance en compression augmente, la résistance en flexion augmente également.

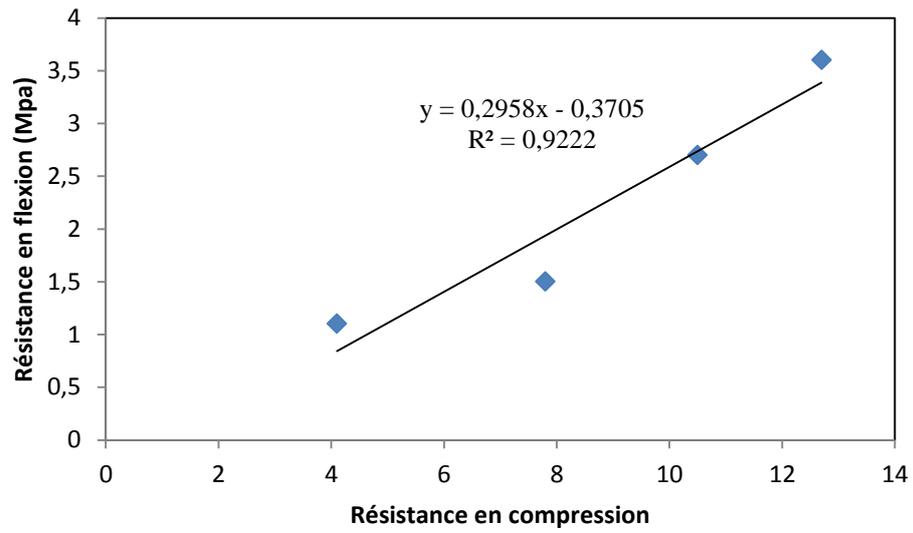


Figure 2- corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion

Chapitre III Chaux aérienne



III.1 Détermination de la chaux libre contenue dans la chaux aérienne - Essai au saccharose

La teneur en chaux libre, aussi appelée chaux non liée est une des caractéristiques les plus primordiales de la chaux aérienne (chaux vive (CaO) et la chaux éteinte (Ca(OH)₂) voire chaux hydratée. En effet, elle exprime la quantité d'oxyde de calcium disponible pour réagir chimiquement. Elle constitue un paramètre essentiel pour le contrôle de la qualité. Par exemple, dans le cas d'un ciment, cette teneur en chaux libre doit être la plus faible possible pour éviter l'expansion, alors que pour les différents types de chaux (chaux vive, chaux hydratée ou chaux calcique), cette teneur est un indicateur de pureté.



Mode opératoire

La méthode analytique pour la détermination de la chaux libre repose sur la solubilité de l'oxyde de calcium (CaO) (chaux vive) et dihydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) (chaux éteinte) dans une solution de saccharose (C₁₂H₂₂O₁₁). Le volume d'acide chlorhydrique, nécessaire à la neutralisation, de la solution alcaline de saccharate de calcium C₆H₈CaO₈, détermine la teneur en chaux libre.



Préparation solution de saccharose de concentration donnée (Figure III.1) [28].

- Peser une quantité de 10,g de saccharose, le soluté, dans une coupelle.
- Introduire le solide bleu dans une fiole jaugée de contenance 50 ml contenant préalablement un faible volume d'eau.
- Rincer la coupelle avec de l'eau distillée et verser l'eau de rinçage dans la fiole jaugée.
- Remplir la fiole jaugée à moitié environ avec de l'eau distillée.
- Après l'avoir bouchée, agiter pour dissoudre le solide.
- Puis compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Le bas du ménisque doit être au niveau du trait de jauge.
- Boucher la fiole et agiter de nouveau.

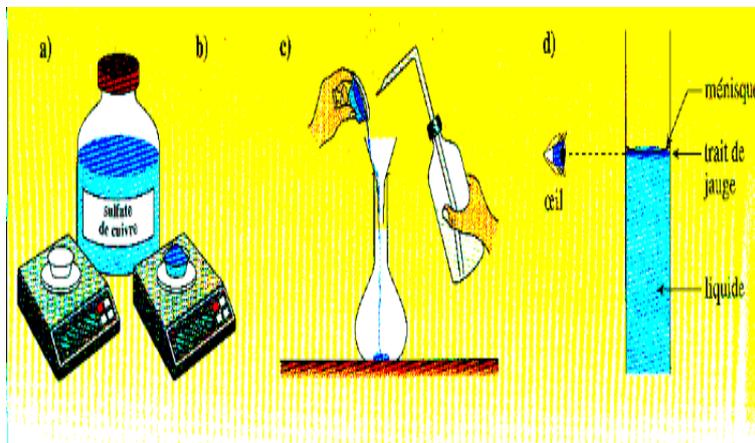


Figure III.1- Préparation d'une solution de saccharose

Chapitre IV Plâtre



IV. 1 Fabrication du plâtre

Le plâtre est un liant hydraulique utilisé depuis très longtemps dans la construction comme enduit et/ou mortier en raison de plusieurs avantages à savoir, l'isolation thermique, la régulation de l'hygrométrie (humidité de l'air), l'isolation acoustique et la résistance au feu. En effet, le plâtre est obtenu à partir de la déshydratation d'une roche naturelle très abondante dans la nature qui est le gypse par excellence. Etant donné que la constitution chimique du gypse contienne environ 20% d'eau ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), il s'avère nécessaire de cuire la roche dans un four à une température avoisinante de 150 °C pour fabriquer le plâtre de la construction (Figure IV.1) [29]. Le gâchage consiste à réhydrater le plâtre, cela va engendrer une prise rapide. La réaction de déshydratation du gypse s'écrit selon l'équation 1.

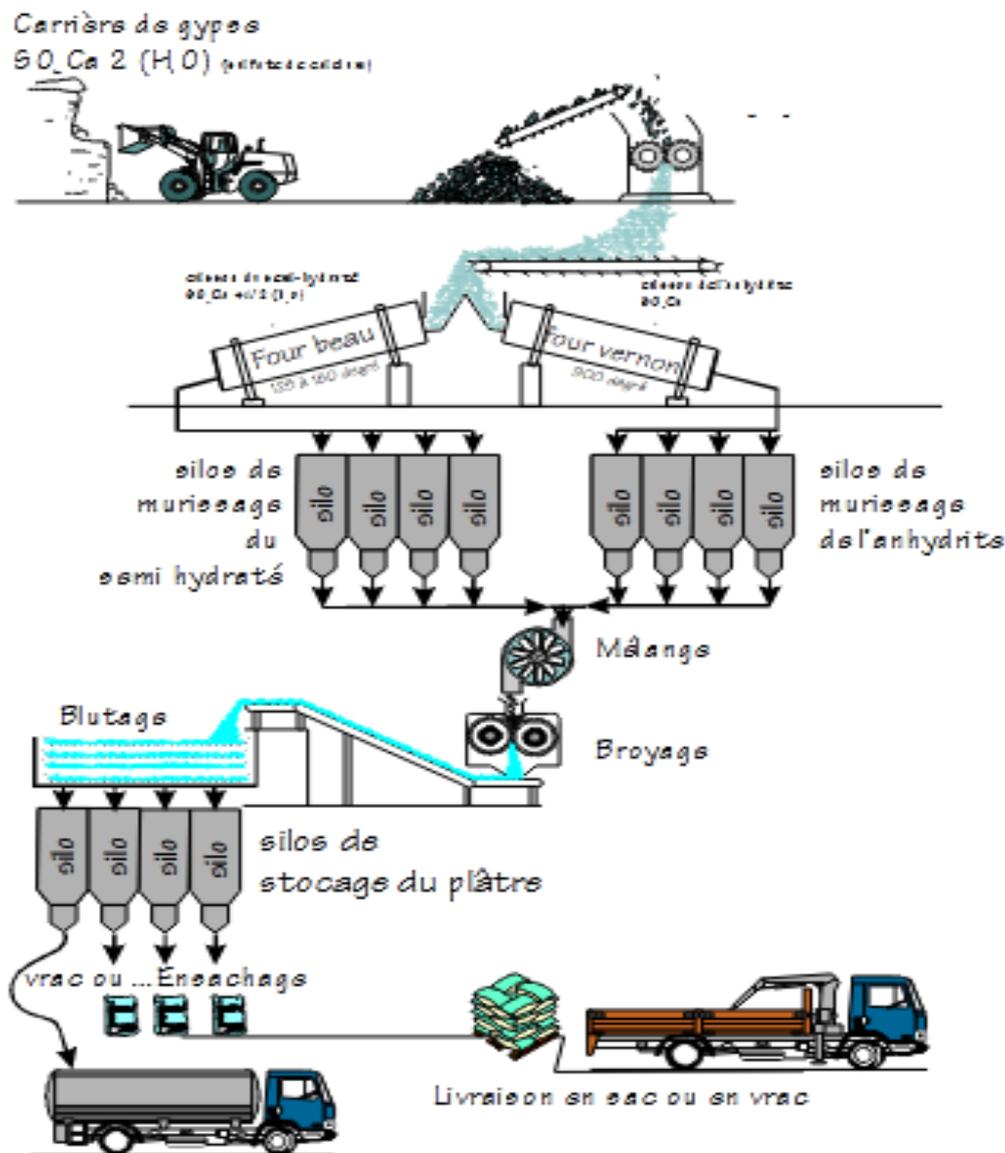


Figure IV.1- Fabrication du plâtre

VI.2 Mesure de la consistance normale du plâtre-But

Mesure de la consistance normale du plâtre



Matériel utilisé

Pour effectuer l'essai on doit se servir du matériel suivant :

- Un cylindre de diamètre 50mm et de hauteur 100mm.
- Une base carrée en verre de 200mm de côté.
- Balance précise.
- Spatule.



Mode opératoire

1. Tracer sur la base de verre deux cercles concentriques de diamètres 60 et 200 mm, servant de repères.
2. Peser environ $300g \pm 1g$ de plâtre et environ une quantité d'eau d'environ 50% de la masse du ciment.
3. Verser l'eau dans un récipient, ensuite la quantité de ciment et mélanger pendant 30secondes sans arrêter.
4. Laisser la pate ainsi obtenue au repos pendant 1 minute.
5. Humecter l'intérieur du cylindre avec de l'eau et le placer au centre de la base de verre.
6. Remuer le mélange et le verser à l'intérieur du cylindre, arraser le surplus.
7. Soulever rapidement le cylindre, la pâte s'étale et forme une galette.
8. La consistance normale est obtenue lorsque le diamètre de la galette est de 12cm.
9. La consistance normale est donnée par la relation suivante :

$$C_n = \frac{\text{Quantité d'eau}}{\text{Quantité du plâtre}} \cdot 100\% \quad (\text{Equ.III.2})$$

VI.3 Temps de début et de fin de prise du plâtre-But

L'essai consiste à déterminer le temps nécessaire du malaxage, du coulage et de durcissement du plâtre.



Matériel utilisé

- Appareil de Vicat muni de l'aiguille.
- Balance.
- Chronomètre.



Mode opératoire

1. Peser $200\text{g} \pm 1\text{g}$ de plâtre et le mélanger avec une quantité d'eau obtenue lors de l'essai de consistance normale.
2. Placer le moule sur une base carrée et verser la pâte de plâtre à l'intérieur et arraser.
3. Placer le moule juste en dessous de la partie mobile de l'appareil et faire descendre l'aiguille de façon à ce qu'elle soit sur la surface de la pâte.
4. Lâcher la partie mobile pour que l'aiguille s'enfonce dans la pâte.
5. Répéter la même opération chaque 30s.
6. Le temps de début de prise est obtenu lorsque l'aiguille s'enfonce dans la pâte et ne pénètre plus jusqu'au fond.
7. Le temps de fin de prise est obtenu lorsque l'aiguille ne pénètre plus dans la pâte.



IV. 3.1 Travail expérimental

Dans le présent travail, vous êtes chargé de déterminer le temps de début et de fin de prise de 3 types de plâtres commercialisés en Algérie à savoir un plâtre de moulage, un plâtre de construction et un plâtre extra-fin et de comparer les résultats trouvés avec ceux des fiches techniques fournies par le fabricant.

Fiche technique des plâtres utilisés

Type de plâtre	Temps de début de prise (min)	Temps de fin de prise (min)
Plâtre de moulage	7-8	14-18
Plâtre de construction	10-13	25-35
Plâtre extra-fin	7-9	18-25

VI.4 Mesure de la finesse de mouture du plâtre NA 527 (ISO 3049:1974) [30]

L'essai consiste à déterminer la qualité du plâtre de construction.



Matériel utilisé

Pour effectuer l'essai, on doit se munir du matériel suivant :

- Tamis N02.
- Balance électronique.
- Etuve.
- Dessiccateur.



Mode opératoire

1. Sécher le plâtre pendant environ 1 heure.
2. Introduire le plâtre dans un dessiccateur et laisser refroidir jusqu'à une masse constante.
3. Peser trois échantillons de plâtre, chacun ayant une masse $M = 50g \pm 0.01g$.
4. Tamiser le plâtre à travers un tamis N02 et peser le refus (R).



IV. 4.1 Calcul

$$\text{Finesse de mouture} = \frac{R}{M} \cdot 100\% \quad (\text{Equ.III.3})$$



IV. 4.2 Travail expérimental

On vous demande de déterminer la finesse de mouture pour deux types de plâtre commercialisés en Algérie à savoir, le plâtre extra fin COLPA- F166 (Lafarge) et le plâtre KNAUF, en utilisant le tamis N02.

VI.5 Résistance mécaniques du plâtre NA 526 (ISO 3051) [31]

L'essai consiste à mesurer la résistance en flexion et en compression du plâtre de construction.



Matériel utilisé

Pour effectuer l'essai on doit se servir du matériel suivant :

- Une balance.
- Un chronomètre.
- Des moules prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm.
- Un appareil de compression et de flexion pour mortier.



Mode opératoire

1. Peser environ $1200\text{g} \pm 1\text{g}$ de plâtre de construction.
2. Peser une quantité d'eau correspondant à une consistance normale.
3. Verser le plâtre dans un récipient et malaxer pendant 1 minute.
4. Remplir soigneusement les moules prismatiques pendant une durée de 30 secondes et araser le refus.
5. Démouler après une heure et stocker les éprouvettes dans l'air pendant 30 minutes.
6. Déterminer la valeur de la résistance en flexion et en compression des éprouvettes.

Nb : la vitesse de chargement de l'appareil d'écrasement doit être $20 \pm 5 \text{kg/cm}^2$ par seconde.



IV. 5.1 Travail expérimental

Dans le présent travail, on vous demande de confectionner des éprouvettes prismatiques de plâtre extra fin-Lafarge Algérie et du plâtre de moulage COLPA et de déterminer la résistance en compression et en flexion à l'âge de 1jour, 7jours, 14jours, 21jours et 28jours. Représentez les résultats sur des graphiques.

Références bibliographiques



- [1] La technologie du béton", 2011, Basf constructions chemicals, France.
- [2] Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker, Romilliat , thèse Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
- [3] NA 442 (EN 197-1), Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [4] Eurofins Lem, "35 Questions pour répondre aux interrogations sur le ciment et sur le béton", f.A.Q, pp 8, 9, novembre, 2010.
- [5] NA 234 (EN 196-1), Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [6] Contexte normatif , Infociments <https://www.infociments.fr>.
- [7] NA 5042 (EN 196-2), Méthodes d'essais des ciments – Analyse chimique des ciments. Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [8] Electif 10, "Mise en forme industrielle des sols et matériaux granulats", cours 3-ciment.ppt, 2011.
- [9] NA 229 (NE 2-1-003:1984),Ciments - Détermination de la consistance normale de la pate de ciment, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [10] NA 228 (NF P 15-414:1960), Ciments - Appareil de Vicat et moule tronconique, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [11]NA 230(EN 196-3:1995 P 15-473), Ciments - Détermination du temps de prise et de la stabilité, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [12] Prise et durcissement du béton , <https://www.toutsurlebeton.fr> › le-ba-ba-du-beton ›
- [13] Opération sur les solides pulvérulents, Marie Debacq, HAL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-02284551>
- [14] Nous mesurons les particules , <https://www.sympatec.fr>.
- [15] NA 231 (EN 196-6:1989 P 15-476), Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la finesse, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [16] NA 5044 (P 15-467: 1985),Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [17] Taylor H.F.W. (1990), Cement Chemistry, London, Academic Press.
- [18] Etude structurale et cristallographie des composés du ciment anhydre. Marie-Noëlle de Noirfontaine, Thèse 2000, Ecole polytechnique, France.

- [19] (<https://www.bcb-tradical.com/la-chaux/fabriquer-la-chaux-aerienne>).
- [20] NA 5011 (EN 459-1 :2002 P 15-104), Chaux de construction - Définitions, spécifications et critères de conformité, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [21] Du calcaire à la chaux. Fabrication et histoire de la chaux. faisons-le-mur.com.
- [22] IS 6932-11 (1983): Methods of Tests for Building Limes, Part 11.
- [23] IS 6932-8 (1973): Méthode d'essai pour les chaux de construction, Partie VIII.
- [24] Méthode d'essai des chaux de construction Détermination de la stabilité.
- [25] IS 6932-4 : Méthode d'essai pour les chaux de construction Détermination de la finesse de la chaux hydratée.
- [26] (Brochure Maisons Paysannes de Moselle : « Les mortiers à la chaux aérienne » Jean-Yves Chauvet, 1981)
- [27] NA 5012 (EN 459-2 :2002 NF P 15-105), Chaux de construction - Partie 2 : méthodes d'essai, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [28] Tp-prép solution de saccharose <http://sites.ensfea.fr>.
- [29] Fours à plâtre - Arts et Culture 71 <http://culture71.cir.ac-dijon.fr>, (Fiches Patrimoine).
- [30] NA 527 (SO 3049:1974), Plâtres - Détermination de la finesse de monture de produit en poudre, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.
- [31] NA 526 (ISO 3051:1974), Plâtres - Détermination des caractéristiques mécaniques, Recueil des normes algériennes, <https://prescriptor.info>.

Annexes





50kg

شاهل
CHAMIL

ALGÉRIE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 32,5 N

CHAMIL Ciment gris pour bétons courants et tous travaux de maçonnerie ; destiné à la construction de votre Maison

CHAMIL
NA442 CEM II/B-L 32,5 N

CHAMIL est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Un ciment « tout en un » pour construire votre maison : permet de réaliser toutes les étapes de construction
- Un bon comportement pour les travaux de maçonnerie : dressage et talochage
- Un temps de prise étudié pour un usage confortable.
- Un Ingrédient Idéal pour la composition des mortiers de finition.

L A member of
LafargeHolcim



50kg

ماتين MATINE

ALGÉRIE



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/A-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, Infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/A-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

H A member of
Lafarge Holcim



UN DEMI SIÈCLE AU SERVICE DE LA CONSTRUCTION.

NA 442/2013

CEM II/A-L 42.5 N

Ciment Portland au Calcaire

Produit disponible chez nos filiales

Société des Ciments de Hadjar Soud
(SCHS, SKIKDA)

Société des Ciments de Ain El Kebira
(SCAEK, SÉLIF)

Société des Ciments de Ain touda
(SCIMAT, Batna)

Société des Ciments de Sour El Chazlene
(SCSEG, Bouira)

Société des Ciments de Béni Saf
(SCIBS, Ain Temouchent)

Société des Ciments de Hamma Bouziane
(SCHB, Constantine)

Société des Ciments de l'Algérois
(SCAL, Alger)

Société des Ciments de Saida
(SCIS, Saida)

Société des Ciments de la Mitidja
(SCMI, Blida)

Entreprise des Ciments et Dérivés d'Ech-Cheiff
(ECDE, Chlef)

www.gica.dz



Nouvel aéroport d'Alger
construit avec le ciment GICA.



Plâtre fabriqué selon les standards européens

- Préparation facile
- Prise régulière et progressive
- Temps de gobetage suffisant
- Facilité de dressage
- Réduction des efforts physiques
- Finition et lissage en douceur

Caractéristiques techniques

- Rendement au sac : 4 à 6 m² / sac / cm d'épaisseur
- Consommation : 8kg / m² / cm d'épaisseur
- Taux de Gâchage E/P : 100%
- Dureté Shore C/enduit sec : 80



Caractéristiques techniques —

- Rendement au sac : 6/7 dalles
- Taux de gâchage E/P : 133
- Shore C : 80

Temps d'emploi : —

- Saupoudrage : 1 mn
- Temps de repos : 1 mn
- Mélange : 1 - 2 mn
- Coulage : 3 - 4 mn
- Démoulage : 15 mn

Consignes de mise en œuvre —

Le gâchage peut être manuel ou mécanique doux, avec du matériel propre. Le temps d'agitation, la pureté de l'eau et le taux de gâchage influent sur le temps de la coulabilité, les résistances mécaniques et la porosité du plâtre hydraté.



Caractéristiques techniques

- Couleur : Blanc
- Taux de Gâchage E/P : à consistance
- Dureté Shore C > 70 à l'état sec
- Consommation : 10kg/m² par 10 mm d'épaisseur
- Rendement « Sac » : 3m²/10 mm d'épaisseur en fonction de la nature et de la régularité du support



Consigne de mise en œuvre

- Préparation : Eau/Plâtre à consistance
- Epaisseur d'Application : 8 à 15mm en une seule passe
- Projection : à 20cm du support
- Dernier réglage : 01 H
- Début de Finition : 02 H
- Temps Total d'utilisation, environ : 03 H



✓ Caractéristiques Techniques

- Granulométrie Tamis: Refus à 200p: 0% Refus à 100p: 1% r.
- Rapport de Gâchage: Eau/Plâtre = 1,50/2 = 0,75 ou Plâtre/Eau = 1,33
- Fluidité (Anneau FLS) : 110-180cm *Début de prise (Couteau) : 5-10 min
- Fin de prise (40 Shore A): 14-25 min *Résistance à la compression: (9,5±1)MPa
- Résistance à la flexion: (1,5±0,5)MPa

✓ Conseils d'utilisation

La modification du rapport Eau/plâtre aura des conséquences directes sur le temps de prise et sur les propriétés mécaniques du produit.

Ce produit est déconseillé pour toutes utilisations exposées aux intempéries ou à une humidité forte Il est recommandé de replier et fermer les sacs ouverts après chaque utilisation

**1- Nom du produit :**

Chaux hydratée – Chaux éteinte – Fleur de chaux

2- Nom chimique :Hydroxyde de calcium Ca(OH)_2

N° C.A.S: 1305-62-0

EINECS: 215-137-3

3- Caractéristiques Granulométriques :

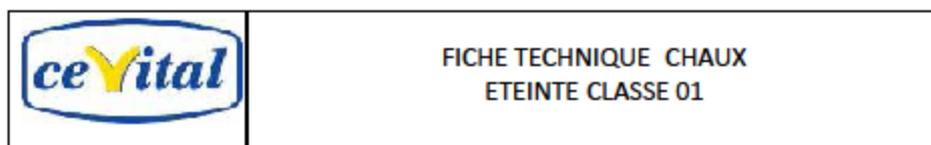
Dimensions du Tamis	Limite du fuseau exprimé en passant %
400 μm	99.99%
300 μm	%99.8
200 μm	%99.5
150 μm	%98.4
125 μm	%97.6
100 μm	%94.4
90 μm	%92.2
80 μm	86.31%
63 μm	%80.7

4- Caractéristiques physiques :

Densité apparente	0.63 g/cm ³
Poids moléculaire	74.09 g/ mole
Aspect	Fine poudre blanche inodore

5- Caractéristiques chimiques :

Hydroxyde de calcium	Ca(OH)_2 Totale	97.92%
Hydroxyde de calcium	Ca(OH)_2 soluble	94.92%
PH		12.4
Humidité		< %1
Oxyde de Fer	Fe_2O_3	%0.03
Oxyde d'Aluminium	Al_2O_3	0.0%6
Oxyde de Magnésium	MgO	< %0.2
Oxyde de Manganèse	Mn_2O_4	0.004%
Oxyde de Silicium	SiO_2	0.16%
Fer	Fe	0.02%



1- Nom du produit :

Chaux hydratée
Chaux calcique éteinte

2- Nom chimique :

Hydroxyde de calcium Ca(OH)_2

3- Caractéristiques physiques :

Finesse	68.52%	<300 μm
	51.82%	<200 μm
	42%	<150 μm
	38.02%	<125 μm
	31.61 %	<100 μm
	23.98%	<80 μm
Densité apparente	0.91 g/ cm ³	
Etat physique	solide	
Aspect	Fine poudre blanche inodore	

4- Caractéristiques chimiques :

Hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 soluble	81.80 %
PH	12
Humidité	< 1%
Carbonate de calcium CaCO_3	18.47%
Dioxyde de carbone CO_2	8.14%

5- Méthode de production :

La chaux vive résulte de la cuisson à environ 1100 -1200° C de pierres calcaires qui devient avec l'eau de la chaux hydratée (éteinte) : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2$ Elle est obtenue en faisant agir de l'eau sur la chaux vive ou en laissant cette dernière à l'air.

6- Conditions de stockage :

- Conserver au sec.
- Stocker de façon isolée à l'abri de l'humidité.
- Séparer des acides.



1- Nom du produit :

Chaux hydratée
Chaux calcique éteinte

2- Nom chimique :

Hydroxyde de calcium Ca(OH)_2

3- Caractéristiques Granulométriques :

Dimensions du Tamis	Limite du fuseau exprimé en passant %
400 μm	53.2%
300 μm	43.6%
200 μm	29.6%
150 μm	20.3%
125 μm	15.6%
100 μm	9.4%
90 μm	7.6%
80 μm	7.6%
63 μm	3.6%

4- Caractéristiques physiques :

Densité apparente	1.3 g/ cm ³
Etat physique	solide
Aspect	Fine poudre blanche inodore

5- Caractéristiques chimiques :

Hydroxyde de calcium	Ca(OH)_2 soluble	43.1%
Humidité		< 1%
PH		11.96
Carbonate de calcium	CaCO_3	42.8%
Dioxyde de carbone	CO_2	18.8%
Oxyde de magnésium	MgO	< 0.2%
Aluminium	Al	0.04%
Oxyde d'Aluminium	Al_2O_3	0.08%
Antimoine	Sb	<0.0005%
Cadmium	Cd	<0.00005%
Chrome	Cr	0.0002%

Unité four à chaux/ QHSE/laboratoire contrôle de qualité/fiche technique chaux éteinte 3ème classe SF d'elkhroub

Page 1

	FICHE TECHNIQUE CHAUX ETEINTE PF 2ème CLASSE
---	---

1- Appellation commerciale et synonymes :

Chaux éteinte PF 2ème Classe, complexe de chaux

2- Nom chimique :

Carbonate de calcium, Oxyde de calcium et hydroxyde de calcium

3- Formule chimique : Mélange complexe principalementCaCO₃- CaO - Ca(OH)₂**4- Caractéristiques physique :**

granulométrie	93.90 % < 2mm
Densité apparente	1.4 g/cm ³
Poids moléculaire	CaCO ₃ 100.09 = 3 , CaO = 56.08 , Ca(OH) ₂ = 74.09 (g/ mole)
Etat physique	solide

5- Caractéristiques chimiques :

Ca (OH) ₂	79.59 %
CaCO ₃	19.67 %
CaO actif	%44.53
Réactivité t60 (min : sec)	02 : 06
CO ₂ résiduel	8.72 %

6- Condition de stockage :

- Garder les contenants bien fermés dans un endroit frais sec et bien aéré à l'abri des acides.