

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

AMMOUCHE Sonia

HALOUANI Siham

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème :

**Etude du remplacement du clinker par d'autres liants hydrauliques à moindre impact
environnemental**

Devant le jury composé de :

Hami Brahim	MCB	UAMOB	Président
MESBOUA Nouredine	MCB	UAMOB	Examineur
ARIBI Chouaib	MCA	UAMOB	Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Nous remercions tout d'abord, le bon Dieu de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la foi pour pouvoir atteindre nos objectifs et surmonter les moments difficiles.

Nous tenons à adresser notre profonde gratitude à notre promoteur Mr Aribi Chouaib qui nous apporté son aide, et qui nous orientés tout au long de ce travail

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur HAMI Brahim, enseignant à l'Université de Bouira pour avoir accepté de présider le jury de notre soutenance, ainsi que le temps qu'il a consacré à nous conseiller sur notre façon de travailler.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à Monsieur MESBOUA Noureddine, enseignant à l'Université de Bouira pour avoir accepté de faire partie du jury de notre soutenance, ainsi que le temps qu'il a consacré à nous conseiller sur notre cheminement vers l'emploi.

Nous remercions toute l'équipe du laboratoire CITIM et en particulier Monsieur BELLAL, Directeur technique au niveau de centre CITIM

Nous remercions également tous les enseignants du département de génie civil et tous les enseignants de l'Université de Bouira qui nous ont enseigné

Enfin Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à ce modeste travail.

Résumé :

L'objectif de cette étude s'oriente vers l'activation hydraulique des argiles riches en silice, quatre échantillons sont sélectionnés, il s'agit des géo-sources qui contiennent des teneurs élevés en silice, des séries d'analyses ont été procédé pour déterminer un régime de traitement thermique d'activation.

Les résultats trouvés montrent que l'activation thermique a des conséquences directes sur le comportement rhéologique, cette activation permet aussi d'améliorer considérablement la résistance mécanique par rapport au témoin et aux coulis à base d'argile non traité.

Mot clés : argiles, rhéologique, activation, résistance mécanique.

Summary

The objective of this study is oriented the hydraulic activation of clays rich in silica, four samples are selected, these are géo-resources which contain high silica contents, series of analyzes are carried out for processes a regime of activation heat treatment.

The results found show that the thermal activation has direct consequences on the rheological behavior, this activation also makes it possible to considerably improve the mechanical resistance compared to the control and to the untreated clay-based grouts.

Keywords : Clay , rheology, activation, mechanical, strength.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة موجه نحو التنشيط الهيدروليكي للطين الغني بالسيليكيا ، تم اختيار أربع عينات ، وهي مصادر جغرافية تحتوي على نسبة عالية من السيليكيا ، وتجرى سلسلة من التحليلات للعمليات بنظام التنشيط بالمعالجة الحرارية.

أظهرت النتائج التي تم العثور عليها أن التنشيط الحراري له عواقب مباشرة على السلوك الريولوجي ، كما أن هذا التنشيط يجعل من الممكن تحسين المقاومة الميكانيكية بشكل كبير مقارنةً بالتحكم والملاط غير المعالج.

الكلمات المفتاحية: الطين ، الريولوجيا ، التنشيط ، القوة الميكانيكية

Introduction générale.....	1
I .1 Le ciment.....	2
I.2 Les constituants de ciment :	2
I.2.1 Clinker Portland (K) :	2
I.2.2 Le gypse :	4
I.2.3 Les ajouts cimentaires :	4
I.2.3.2 Matériaux pouzzolanique :	5
I.2.3.3 Cendres volantes :	5
I.2.3.4 Schiste calciné (T) :	5
I.2.3.5 Calcaire (L, LL) :	5
I.2.3.6 Fumée de silice (D) :	6
I.3 Classification suivant la composition :	6
I.4 Les propriétés de ciment :	8
I .4.1 La prise.....	8
I .4 .3 Fausses prises	10
I .4.4 Chaleur d’hydratation	10
I .4.5 Surface spécifique (finesse Blaine).....	11
I .4.6 Les résistances mécaniques :	12
II.1. Fabrication Du Ciment Portland.....	13
II .1.1 Première étape : préparation du mélange appelé cru de cimenterie.....	13
II .1.2 Deuxième étape: « la cuisson » – le clinker	13
II.2. Procédés de fabrication.....	14
II.3. Broyage – le ciment	15
II.4 Principaux ciments	15
II.3. Composition minéralogique et chimique de ciment.....	16
II.6 Propriétés des ciments.....	17
II.6.1 La consistance normale	17
II.6.3 Surface spécifique de Blaine (SSB)	18
II.6.4 Résistances mécaniques.....	18
III.1 L’impact de l’industrie de ciment sur l’environnement	20
III.1.1 Changement dans le relief naturel	20
III.1.2 Émission de CO2 et rejet de poussière	20
III.2 Estimation de l’effet	20

III.2.1.....	21
III.2.2 Méthode de niveau 2 : utilisation des données de production de mâchefer :.....	23
III.2.3 Méthode de niveau 3 : utilisation des données d'entrée de carbonate :.....	24
III.2.4 Avant de proposer ou bien de chercher la solution pour réduire les émissions de CO2 il faut d'abord avoir les sources d'émission de ce dernier :.....	26
III.3 Les solutions de l'industrie cimentière.....	27
IV.1.3 Résultats des essais physiques.....	30
IV.1.4. Résultats des essais mécaniques :	30
IV.1.4. Résultats des essais chimiques :	31
IV.1.5. Résultats des essais minéralogiques :	31
IV.2 Préparation des éprouvettes :.....	32
IV.2.1 Introduction :.....	32
IV.2.2 Matériaux d'étude :.....	32
IV.2.2.1 Ciment	32
IV.2.2.2 Adjuvant	32
IV.3 Argile :.....	33
IV.3.1 Caractérisation des argiles	33
IV.3.1.1 Morphologie	33
IV.3.2.2 Distribution granulométrique	34
IV.3.3. Masse volumique.....	37
IV.3.4 Surface spécifique de Blaine	38
IV.3.5 Essai de Bleu de méthylène.....	40
IV.4 Composition chimique	42
IV.5 Composition minéralogique	44
IV.6 Comportement rhéologique des coulis	51
IV.6.1 Mode opératoire	54
IV.7 Formulation de colis de ciment	57
Conclusion générale	62

Figure I.1. MEB ; les minéraux principaux du clinker	3
Figure I.2. Laitier de haut fourneau	5
Figure I.3. Fumée de silice	6
Figure I.4. Evolution de temps de prise en fonction de la température.....	8
Figure I.5. Influence de l'E/C sur le temps de prise.....	9
Figure I.6. Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP	10
Figure I.7. Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CP.....	11
Figure I.8. Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression	11
Figure I.9. Résistance du mortier normal	12
Figure II.11. Image MEB de clinker	14
Figure III.12. Emission de CO2 avant et après l'utilisation des déchets.....	28
Figure IV.13. Image MEB des argiles : a. 2- RGC, b. 10-RGC, c. RGC-IMY-Sand.....	34
Figure IV.14. Granulomètre laser Metasizer 2000.....	35
Figure IV.15. Courbe cumulative de l'argile RGC imy sande.....	35
Figure IV.16. Courbe cumulative de l'argile RGC-MAG	36
Figure IV.17. Courbe cumulative de l'argile 10-RRG imy sande	36
Figure IV.18. Courbe cumulative de l'argile 10-RRG imy sande	37
Figure IV.19. Principe de mesure de l'SSB	39
Figure IV.20. Banc d'essai SSB.....	39
Figure IV.21. Banc d'essai SSB	Figure IV.22. Essai de bleu de méthylène .. 41
Figure IV.23. Diffractogramme d'argile RGC-IMY-GOVERSETH MAG à 0-700-850°C ..	46
Figure IV.24. Diffractogramme d'argile 10-RGC à 0-700-850°C.....	47
Figure IV.25. Diffractogramme d'argile RGC-IMY-SAND à 0-700-850°C.....	48
Figure IV.26. Diffractogramme d'argile 2-RGC-IMY-CYCLONE à 0-700-850°C.	49
Figure 27 Différents types d'écoulement de la matière.....	52

Tableau I.1. Composition minéralogique de clinker	2
Tableau I.2. Composition chimique de clinker	4
Tableau I.3. composition des différents ciments selon la norme EN 197-1 [10].....	7
Tableau II.4. Composition minéralogique	16
Tableau II.5. Composition chimique de ciment	17
Tableau IV.6. Résultats des essais physiques.....	30
Tableau IV.7. Résultats des essais mécaniques.....	30
Tableau IV.8. Résultats des essais chimiques.....	31
Tableau IV.9. Résultats des essais minéralogiques.....	31
Tableau IV.10. Composition chimique du ciment.....	32
Tableau IV.11. Propriétés granulométriques des argiles	37
Tableau IV.12. Masse volumique des argiles	38
Tableau IV.13. Surface spécifique de Blaine.....	40
Tableau IV.14. Valeurs de surface spécifique par Blaine et par laser	40
Tableau IV.15. Valeurs de bleu de méthylène.....	42
Tableau IV.15. Composition chimique des argiles avant et après traitement thermique.....	43
Tableau IV.16. Composition minéralogique des argiles avant traitement thermique.....	45
Tableau IV.17. Variation de la composition minéralogique en fonction de températures	50
Tableau IV.18. Modèles de comportement rhéologique.....	52
Tableau IV.19. Résultats de flexion et compression de témoin.....	58
Tableau IV.20. Résultats de flexion et compression coulis à base d'argile sans traitement...	58
Tableau IV.21. Résultats de flexion et compression coulis à base d'argile avec traitement ..	59

Tableau 1. Sources des matières premières entrant dans la fabrication du ciment portland	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2. Composition minéralogique.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3. Composition chimique de ciment.....	17
Tableau 4. Composition chimique du ciment.....	32
Tableau 5. Propriétés granulométriques des argiles	37
Tableau 6. Masse volumique des argiles.....	38
Tableau 7. Surface spécifique de Blaine	40
Tableau 8. Valeurs de surface spécifique par Blaine et par laser.....	40
Tableau 9. Valeurs de bleu de méthylène.....	42
Tableau 10. Composition chimique des argiles avant et après traitement thermique	43
Tableau 11. Composition minéralogique des argiles avant traitement thermique	45
Tableau 11. Variation de la composition minéralogique en fonction de températures.....	50
Tableau 13. Modèles de comportement rhéologique	52
Tableau 13. Résultats de flexion et compression de témoin	58
Tableau 14. Résultats de flexion et compression coulis à base d'argile sans traitement	58
Tableau 15. Résultats de flexion et compression coulis à base d'argile avec traitement	59

Introduction générale

Introduction générale

Notre planète est malade, plusieurs phénomènes ont été menacé la stabilité de notre nature et environnement et aussi interdisent tout forme de vie, parmi lesquelles on distingue l'effet de serre qui provoque une hausse température, le CO₂ est le responsable principal de ce phénomène, ainsi que le réchauffement de la planète qui participe à la progression de cet effet, d'ailleurs les accords de Kyoto et paris sur le changement climatique visant la réduction des émissions.

L'industrie de ciment est une source importante de gaz carbonique (CO₂) ce qui oblige de faire une révision sur les politiques dans la fabrication de ciment non seulement sur l'émission de ce gaz, mais aussi sur le cout des hydrocarbures (une élévation notable) surtout avec la guerre actuelle en Russie, politique et économique qui influe sur le cout des hydrocarbures même dans les pays riches par cette matière essentielle dans l'industrie de ciment.

Les recherches actuelles sur la capacité du remplacement partielle du fioul issu des hydrocarbures par des matériaux de combustion qui proviennent par d'autre industrie (déchets nocifs) ce qui sert à remplacer 30% du fioul et éliminer les déchets.

Ou bien le remplacement total des liants classique cimentaires par d'autre type de liants dit geopolymère mais les règles de calcul de construction en génie civil qui sont appliquées sur la base des liants cimentaire ne permettre pas d'effectuer cette opération

Afin de participer au développement durable l'analyse de cycle de vie permet d'avoir un outil d'aide à la décision sur le volet environnementale et permet de réduire les impacts environnementaux

Le cycle de vie d'un produit prendre compte toutes les activités qui entrent en jeu dans la fabrication, l'utilisation, le transport, et l'élévation de ce produit

Objectif de travail :

Il consiste à étudier les conséquences de la substitution partielle du clinker sur l'analyse de cycle de vie des cimenteries

Chapitre 1
Généralités sur les ciments

I .1 Le ciment

Les ciments usuels sont aussi appelés liant hydraulique car ils ont les propriétés de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau [1].

L'hydratation commence dès que le ciment vient en contact avec l'eau. Cette réaction chimique produit des hydrates de ciment (résultat de l'hydratation), qui se forment à la surface de chaque particule de ciment. Ces hydrates croissent et se répandent, jusqu'au moment où ils se lient avec d'autres qui se sont fixés sur des particules de ciment adjacentes ou adhèrent à d'autres substances voisines. En raison de ce processus continu d'hydratation, le mélange se raidit, durcit et acquiert sa résistance mécanique. L'hydratation continue tant que les conditions d'humidité et de température sont favorables (cure) et que les produits de l'hydratation disposent de l'espace nécessaire [2].

I.2 Les constituants de ciment :

I.2.1 Clinker Portland (K) :

Le clinker Portland est obtenu par calcination d'un mélange fixé avec précision de matières premières (farine crue, pâte) contenant des éléments couramment exprimés en oxydes CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ et de petites quantités d'autres matières. La farine crue ou la pâte, qui est finement divisée et intimement mélangée, est donc homogène.

Le clinker Portland est un matériau hydraulique qui doit être constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium (3CaO.SiO₂ et 2CaO.SiO₂), la partie restante étant constituée de phases contenant de l'aluminium et du fer, ainsi que d'autres composants. Le rapport massique (CaO)/ (SiO₂) ne doit pas être inférieur à 2,0. La teneur en oxyde de magnésium (MgO) ne doit pas dépasser 5,0 % en masse [3].

Tableau I.1. Composition minéralogique de clinker [4].

Constituants	Composition et abréviation	Nom particulier	Pourcentage (%)
Silicate tricalcique	3CaO•SiO ₂ (C ₃ S)	Alite	45-65
Silicate dicalcique	2CaO•SiO ₂ (C ₂ S)	Bélite	15-25
Aluminate tricalcique	3CaO•Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	Célite	0-15
Alumino-ferrite tétracalcique	4CaO•Al ₂ O ₃ •F ₂ O ₃ (C ₄ AF)		0-10

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases :

Le C_3S qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine de double de libérée par le C_2S , donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.

Le C_2S permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme ; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.

Le C_3A est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistances initiales élevées. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue peu à la résistance finale. Elle est ailleurs facilement attaquée par les sulfates.

Le C_4AF , qui forme une solution solide de C_2A et C_2F réagit moins vite que C_3A ; son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment [5].

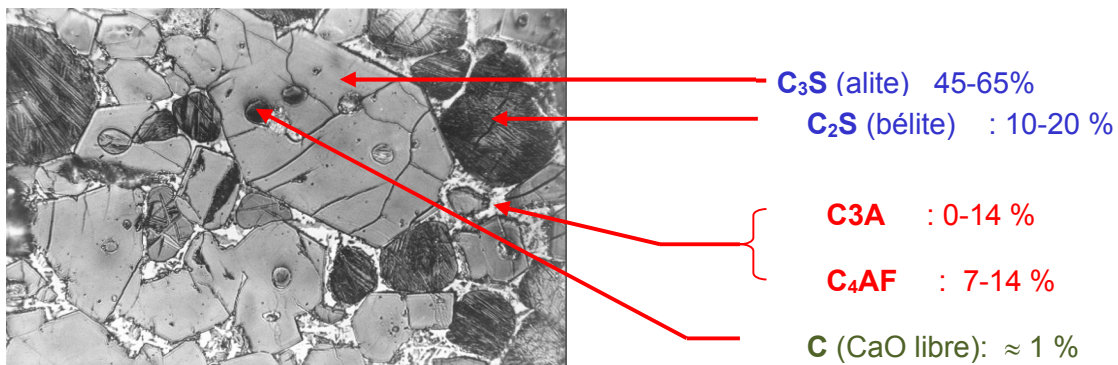


Figure I.1. MEB ; les minéraux principaux du clinker [6].

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO_2), de 2 % à 9 % d'alumine (Al_2O_3), et de 1 % à 5 % d'oxyde de fer (Fe_2O_3)

Tableau I.2. Composition chimique de clinker [6].

Les oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	Cl	Perte au feu
Minimum (%)	20.0	3.7	1.7	61.0	1.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0.2
Maximum (%)	24.3	7.1	5.7	68.1	4.0	1.4	0.7	1.3	0.6	1.2	0.4	0.1	1.1

I.2.2 Le gypse :

Le sulfate de calcium est le régulateur de prise du ciment. Il est introduit à une proportion d'environ 5%. Le sulfate de calcium peut être du gypse (CaSO₄·2H₂O), de l'hémihydrate (CaSO₄·1/2 H₂O) ou de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO₄) ou tout mélange de ceux-ci. Le gypse anhydrite se trouve à l'état naturel. Le sulfate de calcium est aussi obtenu comme sous-produit industriel de certains procédés industriels. Pour éviter ce phénomène gênant de la prise rapide, on régule la cinétique d'hydratation de l'aluminate tricalcique par l'ajout d'environ 5% de gypse. En effet, au lieu d'une réaction rapide, il se produit alors une réaction lente de cinétique comparable à l'hydratation du C₃S [7].

I.2.3 Les ajouts cimentaires :

Les ajouts sont des matières premières naturelles ou artificielles, produits industriels ou déchets industriels polluants. Ils sont ajoutés aux mélanges des matières premières avant le broyage soit à la farine crue soit au clinker portland avant ou après le broyage. Les différents d'ajouts sont :

I.2.3.1 Laitier granulé de haut fourneau (S) :

deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable. Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adaptée provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable [5].



Figure I.2. Laitier de haut fourneau [8].

I.2.3.2 Matériaux pouzzolanique :

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci. Bien que les cendres volantes et les fumées de silice aient des propriétés pouzzolaniques, leurs spécifications font l'objet d'articles séparés. [9].

I.2.3.3 Cendres volantes :

Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres obtenues par d'autres méthodes ne doivent pas être utilisées dans les ciments conformes à l'EN 197-1 [10].

I.2.3.4 Schiste calciné (T) :

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique. Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment SiO₂. En conséquence, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques, comme le ciment Portland [11].

I.2.3.5 Calcaire (L, LL) :

Le calcaire doit respecter les exigences suivantes :

- a) la teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) calculée à partir de la teneur d'oxyde de calcium (CaO) doit être supérieure ou égale à 75 % en masse.
- b) la teneur en argile déterminée par l'essai au bleu de méthylène conformément à l'EN 933-9 ne doit pas être supérieure à 1,20 g/100 g. Cet essai implique que le calcaire soit broyé à une finesse d'environ 5 000 cm²/g déterminée en termes d'aire massique, conformément à l'EN 196-6 ;

c) la teneur totale en carbone organique doit, lorsqu'elle est déterminée selon EN 13639 :1999, être conforme à l'un des critères suivants :

- LL : inférieure à 0,20 % en masse.
- L : inférieure à 0,50 % en masse [12].

I.2.3.6 Fumée de silice (D) :

La fumée de silice provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium ; elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe.

La fumée de silice doit satisfaire aux exigences suivantes :

- a) la perte au feu, déterminée conformément à l'EN 196-2, mais avec un temps de calcination de 1 h, doit être inférieure ou égale à 4,0 % en masse ;
- b) l'aire massique (BET) de la fumée de silice non traitée, déterminée conformément à l'ISO 9277, doit être supérieure ou égale à 15,0 m²/g.

Lorsqu'elle est destinée à être cobroyée avec du clinker et du sulfate de calcium, la fumée de silice peut être soit dans son état d'origine, soit densifiée, soit granulée (avec de l'eau) [12].



Figure I.3. Fumée de silice [11].

I.3 Classification suivant la composition :

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1 donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

1. CEM I Ciment Portland Artificiel;
2. CEM II Ciment Portland composé;
3. CEM III Ciment de haut fourneau;

- 4. CEM IV Ciment pouzzolanique;
- 5. CEM V Ciment aux laitiers et aux cendres [14].

Tableau I.3. composition des différents ciments selon la norme EN 197-1 [10].

Type	Notation	Composition (%)							
		C	L	SF	P	FA	SC	Cal	CS
CEM I	Ciment portland	95-100	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Ciment portland au laitier	65-94	6-35	-	-	-	-	-	0-5
	Ciment portland a la fumée de silice	90-94	-	6-10	-	-	-	-	0-5
	Ciment a la pouzzolane	65-94	-	-	6-35	-	-	-	0-5
	Ciment portland aux cendres volantes	65-94	-	-	-	6-35	-	-	0-5
	Ciment portland au Schiste calciné	65-94	-	-	-	-	6-35	-	0-5
	Ciment portland au calcaire	65-94	-	-	-	-	-	6-35	0.5
	Ciment portland composé	65-94	6-35						0.5
CEM III	Ciment portland de haut fourneau	5-64	36-95	-	-	-	-	-	0.5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	45-89		11-55			-	-	0.5
CEM V	Ciment composé	20-64	18-50	18-50			-	-	0.5

C : clinker

L : laitier haut fourneau

SF: fumée de silice

P: pouzzolanes

FA: cendres volantes

SC: Schiste calciné

Cal: calcaire

CS : constituants secondaires

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certains de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés.

I.4 Les propriétés de ciment :

I .4.1 La prise

Les constituants anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates, des aluminates de calcium hydrates et de la chaux hydratée dite Portlandite formant un gel microcristallin, à l'origine du phénomène dit de « prise » [13].

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- La nature du ciment,
- La finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court,
- température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18heures a 2°C ,de 5 heures a 10°C ,de 3h 30 a 20°C et de 30 min a 35°C

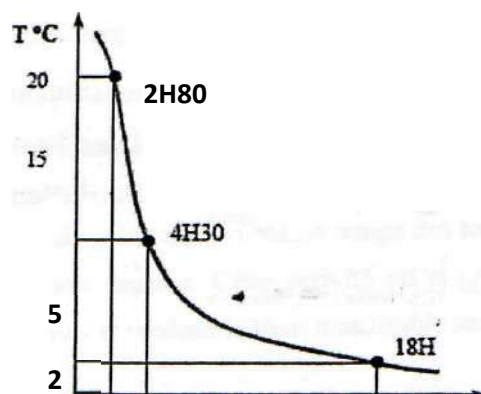


Figure I.4. Evolution de temps de prise en fonction de la température [13].

- La présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise.

- L'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres un inconvénient, retardatrice sur la prise. (fig I.5)

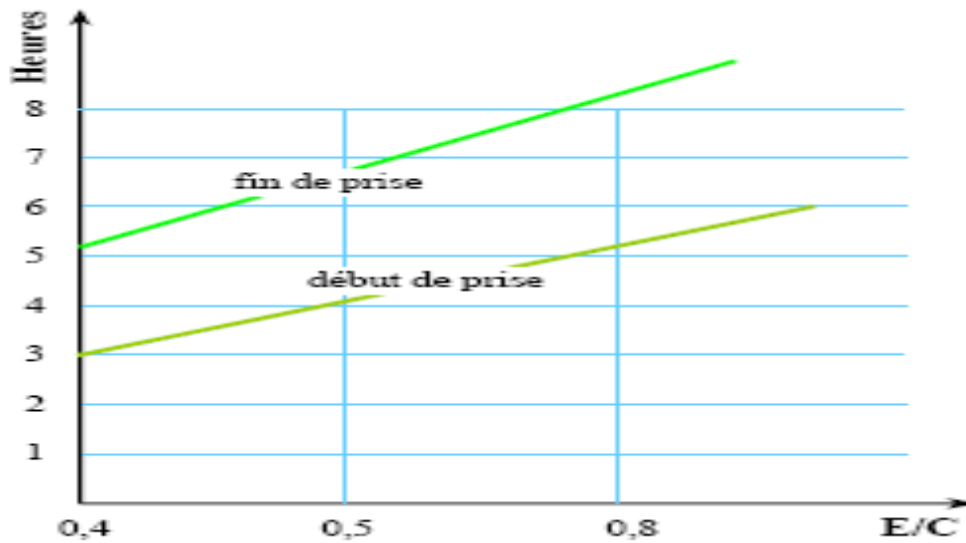


Figure I.5. Influence de l'E/C sur le temps de prise [1].

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20°C :

1 h 30 pour les ciments de classes 35 et 45.

1 h pour les ciments des classes 55.

Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h30 à 3h pour la majorité des ciments.

I .4 .2 Durcissement :

On a l'habitude de considérer le durcissement comme la période qui suit la prise et pendant laquelle l'hydratation du ciment se poursuit. La résistance mécanique continue à croître très longtemps, mais la résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle [13].

Le graphique ci-dessous montre le développement des résistances dans le temps des constituants purs du ciment portland.

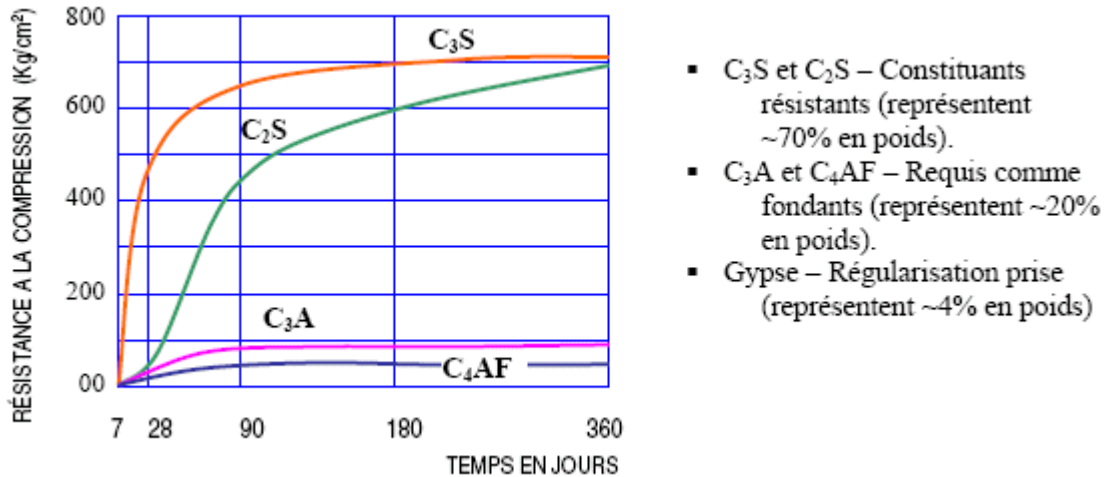


Figure I.6. Le développement des résistances dans le temps des constituants purs du CP [12].

I .4 .3 Fausses prises

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse (sulfate de calcium hydraté à deux molécules d'eau $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors un peu de plâtre $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise, c'est la « fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut surtout pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage. Les ciments les plus sensibles sont ceux à très fine mouture ou à assez fort pourcentage de gypse.

I .4.4 Chaleur d'hydratation

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

- La finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée ;
- La nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires ;
- La nature minéralogique du clinker : plus la teneur en aluminat tricalcique (C₃A) et silicate tricalcique (C₃S) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte ;
- La température extérieure.

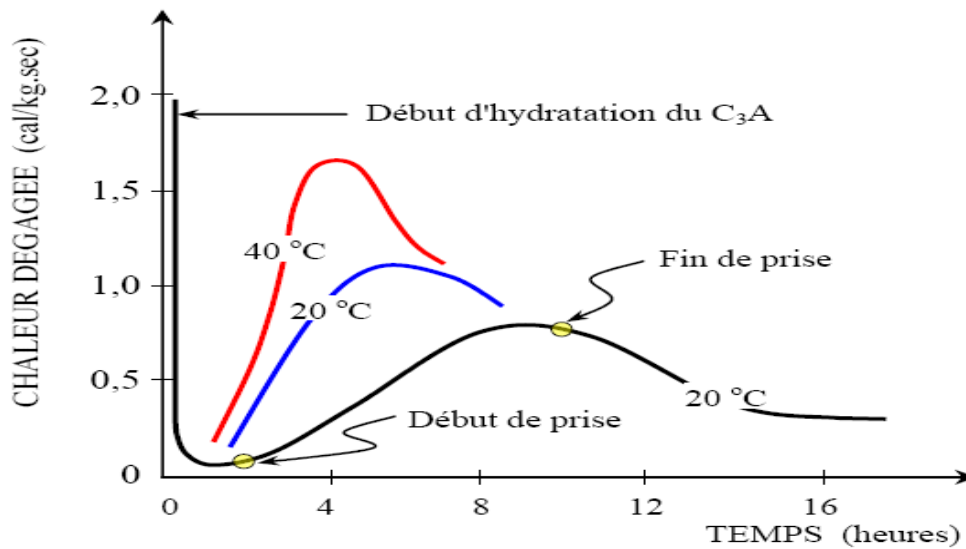


Figure I.7. Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CP [1].

I .4.5 Surface spécifique (finesse Blaine)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique où surface développée totale de tous les grains contenus dans une gramme de ciment (norme NF EN 196-6).

Elle s'exprime en cm²/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2 800 et 3500 cm²/g.

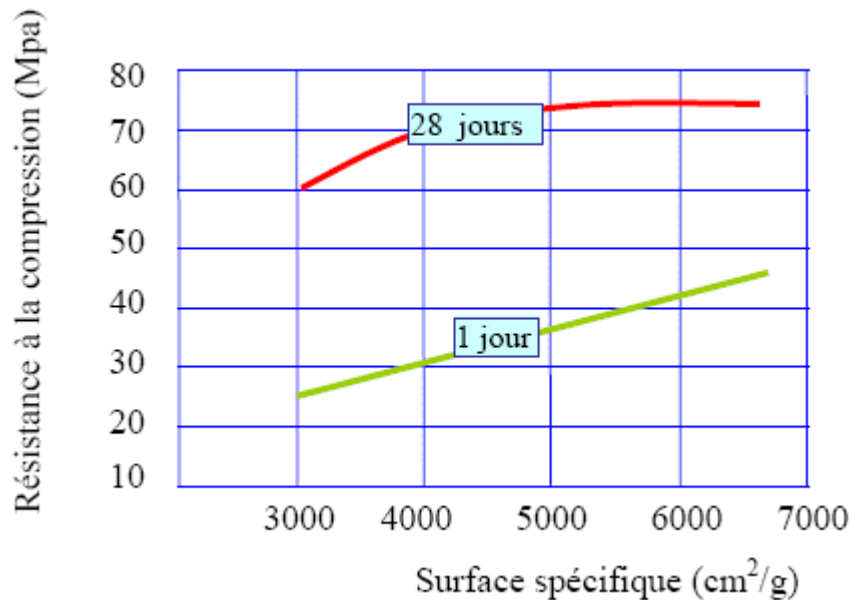


Figure I.8. Influence de la surface spécifique sur la résistance à la compression [13].

I .4.6 Les résistances mécaniques :

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme NF EN 195-1; Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé"

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour lesquelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales [13].

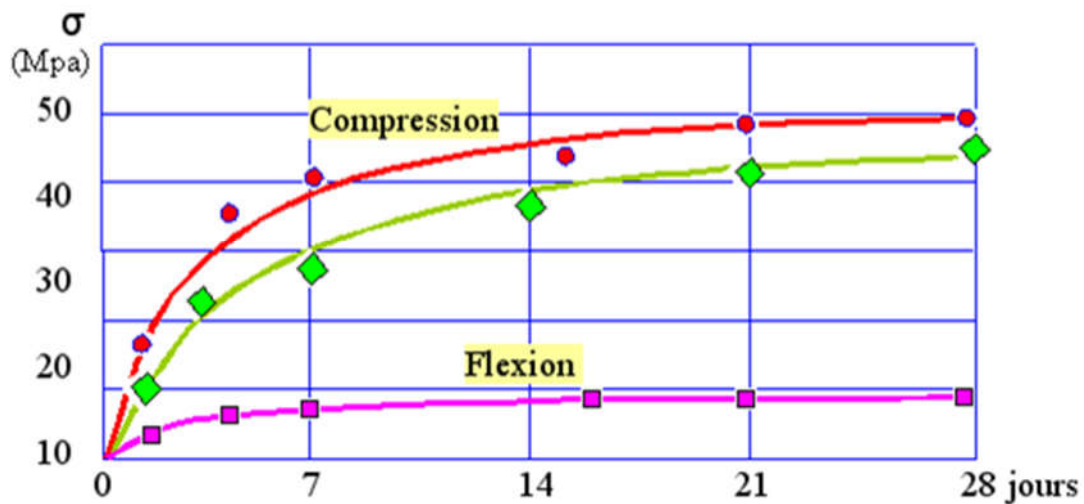


Figure I.9. Résistance du mortier normal [16].

Chapitre II
Fabrication du Ciment Portland

II.1. Fabrication Du Ciment Portland

Par définition, le ciment portland est le produit que l'on obtient en réduisant en poudre un clinker constitué essentiellement de silicates de calcium hydrauliques auxquels on ajoute diverses formes de sulfate de calcium, du calcaire et de l'eau, ainsi que divers produits d'addition, au choix du fabricant.

Les ciments et liants minéraux sont constitués de phases solides anhydres ou partiellement hydratées. Celles-ci sont susceptibles de subir un processus de consolidation appelé durcissement qui correspond :

- Soit à une réaction solide-liquide : il s'agit alors d'une hydratation qui conduit à un solide autre que celui de départ. Les liants hydrauliques ainsi obtenus peuvent agglomérer des matières inertes appelées granulats, comme le sable dans le cas des mortiers, ou comme des graviers, des cailloux et du sable dans le cas des bétons. Dans la catégorie des liants hydrauliques, on trouve le ciment portland artificiel (CPA) et les ciments dérivés, le ciment alumineux et le plâtre.
- Soit à une réaction solide-gaz : il s'agit alors d'un sel qui cristallise. Pour la chaux Ca(OH)_2 , le phénomène de consolidation est dû à l'action du gaz carbonique de l'air qui conduit à la formation d'un sel insoluble le carbonate de calcium CaCO_3 .

Une cimenterie dispose généralement de deux carrières :

- Une carrière de calcaire ou de marne riche en calcaire,
- Une carrière d'argile ou de marne riche en argile.

II.1.1 Première étape : préparation du mélange appelé cru de cimenterie

Les matières premières sont très soigneusement dosées et mélangées, de façon à obtenir une composition parfaitement régulière.

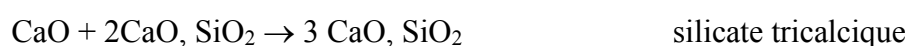
Elles sont ensuite très finement broyées dans des broyeurs rotatifs à boulets pour obtenir un mélange parfaitement homogène des constituants et permettre les réactions ultérieures.

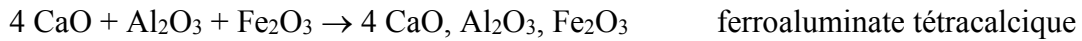
On obtient soit une poudre appelée farine, soit des boulettes agglomérées par addition de 10 à 16 % d'eau, soit une pâte fluide contenant 30 à 45 % d'eau.

II.1.2 Deuxième étape: « la cuisson » – le clinker

La « cuisson » se fait à une température de 1450 °C.

A cette température, les composants se combinent pour donner des silicates bi et tricalciques, du ferroaluminate tétracalcique et de l'aluminate tricalcique.





La chimie des ciments utilise les abréviations suivantes : CaO : C MgO : M Al_2O_3 : A

Fe_2O_3 : F Na_2O : N K_2O : K H_2O : H

On notera donc C_2S le silicate bicalcique, C_3S le silicate tricalcique, C_4AF le ferroaluminat e tétracalcique et C_3A l'aluminat e tricalcique.

II.2. Procédés de fabrication

Trois procédés sont utilisés

1. Par voie humide pour la pâte fluide ce qui nécessite l'emploi d'un four rotatif long de 100 à 200 m,
2. Par voie semi-sèche pour les boulettes ce qui nécessite un four à grille mobile suivi d'un four rotatif court,
3. Par voie sèche pour la « farine » ce qui nécessite un four rotatif long de 100 à 200 m avec des échangeurs internes ou des échangeurs à cyclones associés à un four rotatif court de 50 à 80 m

Dans l'ensemble de cuisson, au fur et à mesure de l'élévation de température, les opérations suivantes se déroulent :

- De 0 à 550°C : élimination progressive de l'eau libre et de l'eau de constitution des matières premières
- De 550 à 900 °C : décarbonatation du calcaire donnant CaO (chaux vive) et CO_2 (gaz carbonique)
- De 900 à 1450 °C : formation du clinker, c'est-à-dire des composants recherchés, silicates, aluminates et ferro-aluminates de calcium. [7]

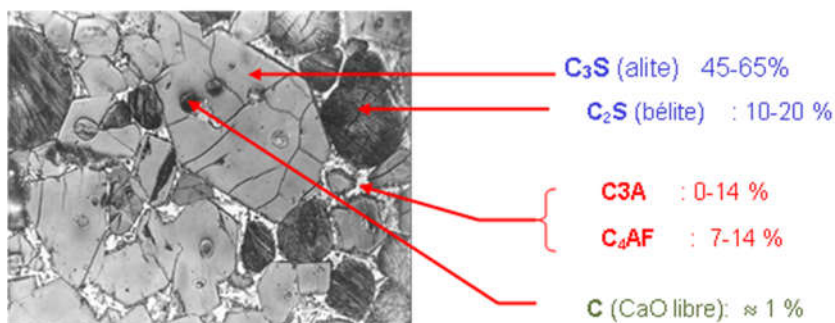


Figure II.10. Image MEB de clinker [6].

II.3. Broyage – le ciment

Le clinker doit être finement broyé pour obtenir le ciment qui réagira au contact de l'eau. Les broyeurs à ciment sont des cylindres tournants. Les corps broyants font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns.

Des distributeurs automatiques assurent un dosage défini et constant des éléments qui doivent entrer dans la composition du ciment fini : clinker + gypse (5 à 7 % destiné à assurer la régularité de la prise) + éventuellement des produits d'addition.

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté mécaniquement ou pneumatiquement vers les silos où il est stocké en attente d'expédition.

Les ciments les plus fréquents sont les suivants :

- Ciment Portland composé (Flexremo 3R et 4R, qui sont des ciments spéciaux pour BAP)
- Ciment Portland
- Ciment Portland au calcaire
- Ciment Portland au schiste calciné
- Ciment Portland au laitier

Les ciments suivants conviennent mieux à la fabrication de béton répondant à des exigences plus élevées, telles que haute résistance, délai de décoffrage raccourci

II.4 Principaux ciments

➤ CPA-CEM I : Ciment Portland

Il contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire pour complément à 100 %.

➤ CPJ-CEM II/A et B : Ciment Portland composé

Les ciments CPJ-CEM II/A sont constitués d'au moins 80 % de clinker. Les CPJ-CEM II/B sont constitués d'au moins 65 % de clinker. Un ou plusieurs des constituants énumérés à l'article 1 forment les parts restantes.

Ces ciments existent dans la plupart des classes (de 32,5 à 52,5) à l'exception des CPJ-CEM II/B qui ne sont pas produits dans les classes 52,5 et 52,5 R.

➤ CHF-CEM III/A et B : Ciment de haut fourneau

Les ciments de haut fourneau contiennent de 35 % à 64 % de clinker pour le CHF-CEM III/A et 20 % à 34 % pour le CHF-CEM III/ B, le reste des constituants étant du laitier avec éventuellement 5 % au maximum de constituants secondaires.

➤ **CLK-CEM III/C : Ciment de haut fourneau**

Ce ciment contient de 81 % à 95 % de laitier, le reste des constituants étant du clinker ou des constituants secondaires (5 % au maximum). Il existe en classe 3

➤ **CPZ-CEM IV/A et B : Ciment pouzzolanique**

Les ciments pouzzolaniques contiennent de 65 % à 90 % de clinker pour le CPZ-CEM IV/A et de 45 % à 64 % pour le CPZ-CEM IV/B.

Le reste des constituants étant de la pouzzolane naturelle, des cendres volantes siliceuses ou de la fumée de silice, avec éventuellement 5 %, au maximum, de constituants secondaires. Ces ciments sont actuellement produits dans la classe 22,5 des ciments à usage tropical (norme NF P 15-302).

➤ **CLC-CEM V/A : Ciment au laitier et aux cendres**

Ce ciment contient de 40 % à 64 % de clinker, de 18 % à 30 % de cendres volantes siliceuses et de 18 % à 30 % de laitier, avec éventuellement 5 % au maximum de constituants secondaires. Le CLC-CEM V/B prévu par la norme n'est actuellement pas produit.

II.3. Composition minéralogique et chimique de ciment

Pendant la cuisson des matières premières dans le four rotatif, les oxydes se lient entre eux pour former les minéraux du clinker qui sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau II.4. Composition minéralogique [4].

Notation	Nom	Formule chimique	Teneur en %
C ₃ S	Silicate tricalcique (l'alite)	3CaO. SiO ₂	45 à 65%
C ₂ S	Silicate bi calcique (bélite)	2CaO. SiO ₂	15 à 35%
C ₃ A	Aluminate tricalcique (celite)	3CaO. Al ₂ O ₃	4 à 14%
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique (félite)	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	10 à 18%

Tableau II.5. Composition chimique de ciment [6].

Les oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	Cl	P.F
Minimum (%)	20.0	3.7	1.7	61.0	1.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0.2
Maximum (%)	24.3	7.1	5.7	68.1	4.0	1.4	0.7	1.3	0.6	1.2	0.4	0.1	1.1

II.6 Propriétés des ciments

II.6.1 La consistance normale

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. La consistance dite "consistance normalisée" peut être déterminée par l'essai en utilisant un appareil qui s'appelle "Vicat"

La distance (d) caractérise l'aptitude de la consistance de la pâte étudiée.

- Si $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée, (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d. $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

II.6.2 Le temps de prise :

(Norme NF P 18-362): compte tenu de la température ambiante, le coulis ne devra pas faire prise trop tôt (risque d'obturation des gaines), ni trop tard (risque d'exsudation). Les temps de prise sont mesurés à trois températures différentes : 5, 20 et 30 °C.

Par temps chaud, le début de prise déterminé à 30 °C devra être supérieur à 3 h. Par temps froid, la fin de prise déterminée à 5 °C devra être inférieure à 24 h (au-delà, le risque de gel du coulis devient important).

II.6.3 Surface spécifique de Blaine (SSB)

Elle permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique où surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 3500 cm^2/g . Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible à l'éventuellement et plus le retrait est important.

II.6.4 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^3$. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Chapitre III

Impact de l'industrie de ciment sur l'environnement

III.1 L'impact de l'industrie de ciment sur l'environnement

III.1.1 Changement dans le relief naturel

L'exploit des carrières pour l'extraction de calcaire et argile résulte un gisement aux niveaux de ces endroits ce qui provoque un changement dans la géométrie terrestre

III.1.2 Émission de CO₂ et rejet de poussière

-La fabrication de ciment repose sur un processus à haute rendement énergétique et la garantie d'un produit de qualité, mais pour la fabrication d'une tonne de ciment on aura près une tonne de CO₂ émit dans l'atmosphère lors la phase de décarbonatation (accélération dans l'effet de serre)

- Une couche poussiéreuse se forme dans l'atmosphère lors de la cuisson par voie sèche ce qui une pollution des eaux du sol et de l'aire

- Le transport de la matière première dans les carrières jusqu'aux usines de ciment par camions émit de CO₂ dans le transport, et de poussière (particules)

- Pollution des eaux superficielles et souterraines par les aires d'évacuation des déchets, par les rejets de charges de fours (ph élevé, matière en suspension, solides dissous, principalement du potassium et du sulfates), et par les eaux de refroidissement

-la santé des personnes des usines cimentaires est en risque à cause des émissions des particules de silice

III.2 Estimation de l'effet

Dans la fabrication du ciment, le CO₂ se produit pendant la production du mâchefer, produit nodulaire intermédiaire qui est ensuite moulu finement, avec une faible proportion de sulfate de calcium [gypse (CaSO₄·2H₂O) ou d'anhydrite (CaSO₄)], en ciment hydraulique (du type « *portland* »). Pendant la production de mâchefer, la pierre calcaire, qui est essentiellement du carbonate de calcium (CaCO₃), est chauffée ou brûlée pour produire de la chaux (CaO) et du CO₂ comme dérivé. La CaO réagit ensuite avec du silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃), et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) dans les matières premières brutes pour faire les minéraux de mâchefer (principalement des silicates de calcium). La proportion, dans les matières premières, de carbonates autres que le CaCO₃ est en général infime. Les autres carbonates, lorsqu'il y en a, existent essentiellement en tant qu'impuretés dans la matière première primaire de pierre calcaire. Une petite quantité de MgO (1 à 2%) dans le procédé de fabrication du mâchefer est souhaitable puisqu'il sert de fondant, mais une bien plus grande quantité peut mener à des problèmes avec le ciment (van Oss et Padovani, 2002). Le ciment peut être fait (moulu) entièrement à partir de mâchefer importé, dans lequel cas la cimenterie peut être considérée

comme ayant des émissions nulles de CO₂ liées au procédé. , la poussière de four de ciment peut être générée pendant la fabrication de mâchefer. Les estimations d'émissions doivent prendre en compte l'émission associée à la poussière de four de ciment

III.2.1 Méthode de niveau 1 : estimation de production du mâchefer par l'utilisation des données de production :

Le calcul des émissions de CO₂ provenant directement de la production de ciment (ex : en utilisant un facteur fixe d'émission fondées sur le ciment) n'est pas conforme aux bonnes pratiques , au lieu de cela dans l'absence de données sur les entrées de carbonate ou de données de production nationale de mâchefer , les données de production de ciment peuvent être utiliser pour estimer la production de mâchefer , y compris une exportations du mâchefer est un critère essentiel dans l'estimation d'émission de cette source, les émission provenant de la production de mâchefer importé ne doivent pas être inclus dans les estimations d'émissions nationales puisque ces émission ont été produites et comptabilisées dans un autre pays (exportateur), de même les émission émanant du mâchefer exporté doivent être entrés dans les estimations nationales du pays dans lequel le mâchefer est produit (pays producteur-exportateur) , on procède ensuite en appliquant un facteur d'émission pour le mâchefer et en calculant les émissions de CO₂ suivant l'équation : [14].

EQUATION 1

$$\text{Emissions CO}_2 = \left[\sum_i (M_{ci} \cdot C_{cli}) - Im + Ex \right] \cdot FE_{clc}$$

À savoir :

Émissions CO₂ = émissions de CO₂ provenant de la production de ciment

(en tonnes) M_{ci} = poids (masse) de ciment produit³ de type i (en tonnes)

C_{cli} = fraction mâchefer de ciment de type i , fraction

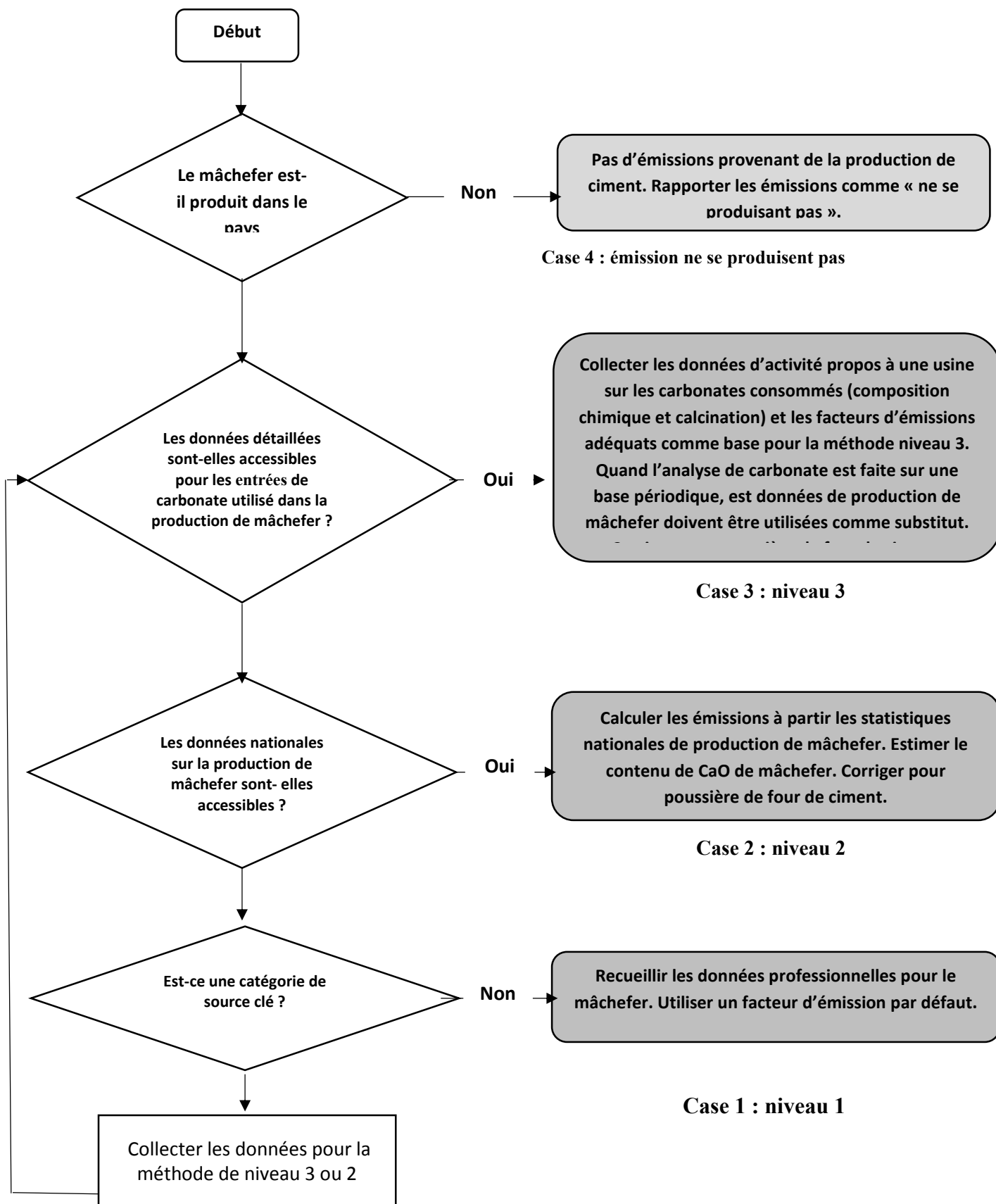
Im = importations pour consommation de mâchefer (en tonnes)

Ex = exportations de mâchefer (en tonnes)

FE_{clc} = facteur d'émissions pour le mâchefer dans le ciment spécifique, tonnes

CO₂/tonne mâchefer Le facteur d'émissions (FE_{clc}) est corrigé pour la poussière de four de ciment.

Arbre de décision pour l'estimation des émissions de CO₂ de la production de ciment : [14].



III.2.2 Méthode de niveau 2 : utilisation des données de production de mâchefer :

Si les données détaillées et complètes (comprenant les poids et composition) pour le(s) carbonate(s) consommé(s) dans la production de mâchefer ne sont pas disponibles (niveau 3), ou si une approche rigoureuse de niveau 3 est autrement considérée irréalisable, les *bonnes pratiques* veulent que soient utilisées les données usine d'ensemble ou les données de production nationale de mâchefer sur le contenu CaO de mâchefer, exprimées comme facteur d'émissions dans l'équation 2 ci-dessous :[14].

Equation 2**Niveau 2 : émissions fondées sur les données de production de mâchefer**

$$\text{Emission de CO}_2 = M_{ci} \bullet FE_{cl} \bullet CF_{ckd}$$

À savoir:

Émissions CO₂ = émissions de CO₂ provenant de la production de ciment

(en tonnes) M_{ci} = poids (masse) de mâchefer produit de type i (en tonnes)

FE_{cl} = facteur d'émissions de mâchefer, tonnes CO₂/tonne mâchefer (Cf. discussion dans la section 2.2.1.2, Choix des facteurs d'émission, pour les niveaux 1 et 2 ci-dessous.) Ce facteur d'émission (FE_{cl}) n'est pas corrigé pour la poussière de four de ciment.

CF_{ckd} = facteur de correction d'émissions pour la poussière de four de ciment, illimité (cf. équation 2.5)

L'approche de niveau 2 s'appuie sur les hypothèses suivantes sur l'industrie du ciment et la production de mâchefer :

1. La majorité de ciment hydraulique est du ciment portland ou un ciment similaire qui nécessite du mâchefer de ciment portland ;
2. Il y a une portée limitée dans la composition de CaO de mâchefer et le contenu de MgO est maintenu très bas ;
3. En général les usines peuvent contrôler le contenu de CaO des entrées de matières premières et de mâchefer dans des tolérances serrées ;
4. Même lorsque la sortie de mâchefer est calculée par une usine plutôt que mesurée directement, il y a en général une forte similitude entre les deux méthodes de détermination lorsque les contrôles sont effectués ;
5. Le contenu de CaO de mâchefer d'une usine donnée tend à ne pas changer de manière significative au fil des ans ;
6. La principale source de CaO pour la plupart des usines est le CaCO₃ et, au moins au niveau de l'usine, toutes les sources non carbonates de CaO sont facilement quantifiées
7. Un facteur de calcination de 100% (ou tout proche) est atteint pour les entrées de carbonate pour la fabrication de mâchefer, y compris (en général dans une moindre mesure) le matériau perdu dans le système comme poussière de four de ciment non recyclée ; et
8. Les collecteurs de poussière en usines capturent essentiellement toute la

poussière de four de ciment bien que ce matériau ne soit pas nécessairement recyclé dans le four.

III.2.3 Méthode de niveau 3 : utilisation des données d'entrée de carbonate :

Le niveau 3 s'appuie sur la collecte des données désagrégées sur les types (composition) et quantités de carbonate consommés pour produire de mâchefer ainsi que sur les facteurs respectifs d'émission de carbonates consommés, les émissions sont ensuite calculées en appliquant l'équation 3, l'approche de niveau 3 comprend une correction pour soustraire tout carbonate non calciné dans la poussière de four de ciment non retourné dans le four. Si cette poussière est totalement calcinée, ou si elle est entièrement retournée au four, ce facteur de correction de la poussière devient nul. Le niveau 3 est toujours considéré comme une bonne pratique dans les cas où les compilateurs de l'inventaire n'ont pas accès aux données sur la poussière non calcinée de four de ciment. Toutefois, le fait d'exclure cette poussière non calcinée peut légèrement surestimer les émissions.

Les pierres de chaux et les schistes (matières premières brutes) peuvent aussi contenir une proportion de carbone organique (kérogène), et d'autres matières premières (exemple : les cendres volantes) peuvent contenir des résidus de carbone qui peuvent donner du CO₂ supplémentaire lors de la combustion. Ces émissions ne sont en général pas comptabilisées dans le Secteur Énergie, mais, si elles sont largement utilisées, les compilateurs de l'inventaire doivent s'assurer qu'elles sont incluses dans le Secteur Énergie. Toutefois actuellement, il y a trop peu de données sur les teneurs en kérogène ou carbone des matières premières non combustibles pour les procédés minéraux pour pouvoir donner une valeur significative par défaut liée à la teneur moyenne de kérogène des matières premières ; pour les calculs fondés sur les matières premières au niveau des usines (niveau 3) ou le contenu en kérogène est élevé (contribuant pour 5 à la chaleur totale), les bonnes pratiques recommandent que soit incluse la contribution de kérogène dans les émissions.

L'approche de Niveau 3 ne sera sans doute utile que pour des usines et des pays individuels qui ont accès à des données détaillées au niveau des usines concernant les matières premières de carbonate. Les données d'émissions recueillies au niveau des usines doivent alors être agrégées pour obtenir un rapport d'estimations nationales d'émissions. Il est reconnu que de fréquents calculs d'émissions appuyés sur l'analyse directe de carbonates pourraient s'avérer pénibles pour certaines usines. Du moment que des analyses chimiques détaillées d'entrées de carbonate sont faites assez fréquemment pour établir une bonne corrélation entre les carbonates consommés au niveau des usines et la production de mâchefer qui en résulte, la sortie de mâchefer peut alors être utilisée comme substitut de carbonates pour les calculs d'émissions dans les périodes intermédiaires. C'est-à-dire qu'une usine peut tirer un facteur d'émissions rigoureusement contraint pour le mâchefer de l'usine, fondé sur un calibrage périodique des entrées de carbonate [14].

ÉQUATION 3

NIVEAU 3 : EMISSIONS FONDEES SUR LES ENTREES DE MATIERES PREMIERES DE CARBONATE DANS LE FOUR

$$\text{Emissions de CO}_2 = \underbrace{\sum (FE_i \cdot M_i \cdot F_i)}_{\text{Emissions provenant de carbonates}} - \underbrace{M_d \cdot C_d \cdot (1 - F_d) \cdot FE_d}_{\text{Emissions provenant de poussière de four de ciment non calcinée ni recyclée dans le four de calcination}} + \underbrace{\sum (M_k \cdot X_k \cdot FE_k)}_{\text{Émissions provenant de matériaux non combustibles porteurs decarbonates}}$$

À savoir:

Émissions de CO₂ = émissions de CO₂ de la production de ciment (en tonnes)

FE_i = facteur d'émissions pour le carbonate spécifique *i*, tonnes CO₂/tonne carbonate (cf. tableau 2.1) M_i = poids ou masse de carbonate *i* consommé dans le four (en tonnes)

F_i = calcination partielle obtenue pour le carbonate *i*, fraction^a

M_d = poids ou masse de poussière de four de ciment non recyclée dans le four (= poussière perdue) (en tonnes)

C_d = fraction du poids du carbonate d'origine dans cette poussière non recyclée dans le four, fraction^b F_d = calcination partielle obtenue pour cette poussière non recyclée dans le four, fraction^a

FE_d = facteur d'émissions pour le carbonate non calciné dans cette poussière non recyclée dans le four, tonnes CO₂/tonne carbonate^b

M_k = poids ou masse de matière première *k* organique ou autre non combustible porteur de carbone, tonnes^c

X_k = fraction de carbone totalement organique ou autre carbone dans une matière première *k* de noncombustible spécifique, fraction^c

EF_k = facteur d'émissions pour une matière première *k* non combustible porteuse de kérogène (ou autre carbone), tonnes CO₂/tonne carbonate^c

Notes sur les défauts pour l'Équation 3 :

A : Fraction de calcination : en l'absence de données réelles, l'hypothèse peut être que, aux températures et temps de séjour obtenus dans les fours de ciment (mâchefer), le degré de calcination obtenu pour tout matériau incorporé dans le mâchefer est de 100% (à savoir F_i = 1,00) ou tout proche. Pour la poussière de four de ciment, une F_d de <1,00 est plus probable, mais les données peuvent révéler une grande variabilité et relativement peu de fiabilité. En l'absence de données fiables pour la poussière de four de ciment une hypothèse de F_d = 1,00 signifie que la correction pour cette poussière est égale à zéro

B : Parce que le carbonate de calcium est très largement le carbonate dominant dans les matières premières, il peut être supposé qu'il constitue 100% du carbonate restant dans la

poussière de four de ciment non recyclée dans le four. Ainsi il est acceptable dans le cadre des *bonnes pratiques* de fixer C_d égal à la proportion de carbonate de calcium dans la matière première qui alimente le four. De même, il est acceptable d'utiliser le facteur d'émissions pour le carbonate de calcium pour EF_d .

C : Les émissions de CO_2 provenant de carbone non carbonate (par ex. le carbone dans le kérogène, dans les cendres volantes) dans les matières premières non combustibles peuvent être ignorées (fixer $M_k \cdot X_k \cdot EF_k = 0$) si la contribution de chaleur provenant du kérogène ou d'autre carbone est $< 5\%$ de la chaleur totale (provenant des fiouls).

Recherche sur la solution :

Afin de participer au développement durable, l'analyse de cycle de vie permet d'avoir un outil d'aide à la décision sur le volet environnemental et permet de réduire les impacts environnementaux, le cycle de vie des cimenteries prend en compte de toutes les activités qui entrent en jeu dans la fabrication, l'utilisation et le transport

L'Algérie a intégré la dimension du développement durable dans ses plans de développement, y compris dans un souci de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre. De même qu'elle a adopté des mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique et une politique de promotion des énergies renouvelables. Elle a, enfin, fait de la technologie du captage et du stockage.

III.2.4 Avant de proposer ou bien de chercher la solution pour réduire les émissions de CO_2 il faut d'abord avoir les sources d'émission de ce dernier :

Les sources d'émission de CO_2 peuvent être les suivantes :

- Calcination des carbonates et combustion du carbone organique contenu dans la matière première ;
- Combustion des combustibles fossiles (dans le four et en dehors) ;
- Combustion de la biomasse dans le four (non comptabilisée comme GES).

Les émissions totales de CO_2 dépendent par conséquent des paramètres suivants :

- Type de processus (efficacité du processus et des sous-processus) ;
- Combustible utilisé ;
- Rapport clinker/ciment.

L'émission de dioxyde de carbone (CO_2) représente 900 à 1000 kg/tonne de clinker gris, en référence à une consommation spécifique d'environ 3 500 à 5 000 MJ/tonne de clinker, mais en fonction du type même de combustible. Le rapport est inférieur si l'on se réfère aux tonnes de ciment, puisque lors du broyage du ciment, d'autres minéraux et du plâtre sont ajoutés. Dans le cas du clinker blanc, le rapport est supérieur à cause d'une plus grande consommation énergétique. Dans la fabrication du ciment gris par voie sèche, environ 60 % du CO_2 généré provient du processus de dissociation du carbonate de calcium du calcaire en oxyde de calcium

et en CO₂ (appelée décarbonatation ou calcination du calcaire), et les 40 % restants sont issus de la combustion du combustible. Les émissions provenant de la combustion sont directement proportionnelles à la consommation spécifique et au rapport entre le contenu en carbone (C) et le pouvoir calorifique du combustible. Dans le cas de la biomasse, son émission n'est pas comptabilisée dans celle des GES (gaz à effet de serre). Les émissions du CO₂ de la combustion dans l'industrie du ciment ont été réduites progressivement, autour de 30 %, lors de ces 25 dernières années, principalement grâce à l'installation de fours plus efficaces.

Les solutions :

Utilisation des techniques de production plus propre :

Possibilité d'utilisation de sous- produits issus d'autre industrie pour remplacer certains constituants du ciment sans modifier la qualité

L'utilisation correcte de la matière première, des combustibles alternatifs et d'adjuvants minéraux

La valorisation des déchets en cimenterie présente des avantages pour l'environnement (la haute température des fours permet une destruction totale des molécules organiques, même complexe des déchets) et aussi permet de limiter :

- L'émission de gaz à effet de serre en économisant :
- Les matières premières naturelles non renouvelables,
- Les énergies fossiles (pétrole, charbon, etc.),
- De diversifier ses ressources en énergie et donc de réduire sa facture énergétique en étant moins dépendant du cours des combustibles traditionnels,
- De rendre service à la collectivité en recyclant des déchets qui auraient dû être traités et éliminés.

L'utilisation des capteurs intelligents qui mesure les émissions, et qui surveille le processus, ainsi la mesure de concentration en poussière et en gaz et, le flux volumétrique.

III.3 Les solutions de l'industrie cimentière

Actuellement, l'industrie cimentière apporte dans le domaine de la valorisation énergétique une solution écologique et sûre à la gestion de certains types de déchets organiques en les utilisant comme combustibles alternatifs : farines animales, huiles usées, dissolvants, cosses de café, balles de riz, coques de palme à huile, déchets plastiques...etc. En même temps, l'industrie cimentière apporte un potentiel important de contributions environnementales dans la gestion de déchets d'autres activités industrielles, puisqu'ils peuvent être utilisés comme matière première dans la préparation du cru (cendres, boues de l'industrie papetière, sables de fonderie,

etc.) et/ou comme adjuvants dans le broyage du ciment (scories de haut-fourneau, fumée de silice, etc.).

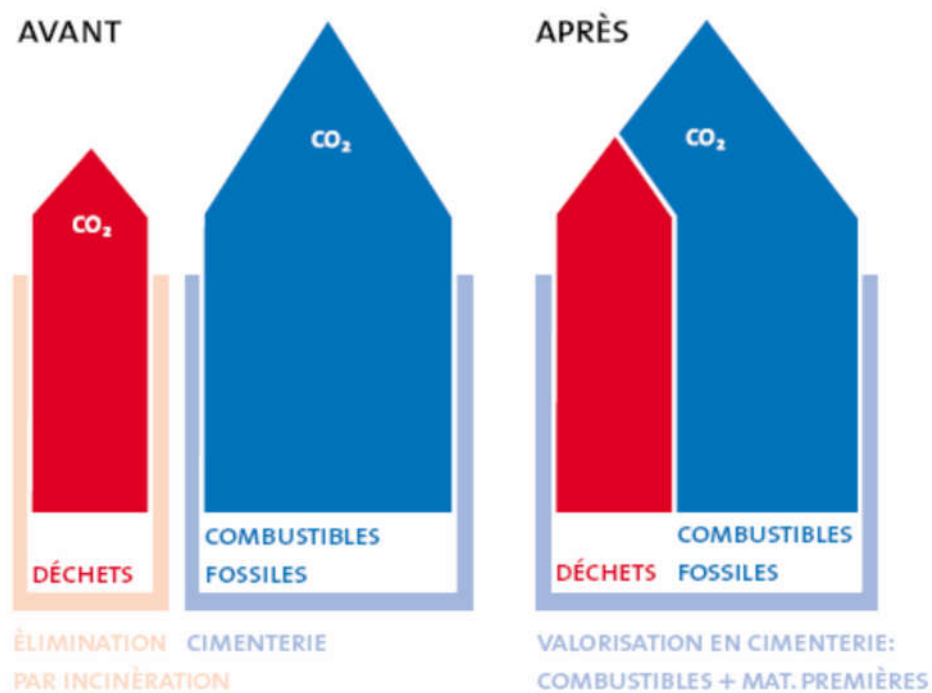


Figure III.11. Emission de CO₂ avant et après l'utilisation des déchets.

CHAPITRE- IV
Etude Expérimental

IV.1 Fiche technique du ciment utilisé :

IV.1.1 Essais réalisés :

- **Essai mécanique :**

Détermination des résistances mécaniques à 2 et 28 jours

- **Essais physique :**

Détermination de la consistance normalisée

Détermination du temps de prise

Détermination de la stabilité

Mesure de la masse volumique absolue du ciment

Détermination de la finesse

- **Essais chimique :**

Analyse élémentaire par spectrophotométrie de fluorescence X

Détermination de la perte au feu

Détermination du résidu insoluble

Détermination de la teneur en chlorures

La détermination de la teneur en anhydrite sulfurique (SO₃)

Dosage de la chaux libre

IV.1.2 Modalité des essais :

- **Essais mécaniques:** la détermination des résistances mécanique à 2 et 28 jours est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme NA234

- **Essais physique :** les déterminations de la consistance normalisée, le temps de prise et de la stabilité sur ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme NA 230.

Les déterminations de la finesse par perméabilité de l'air et la masse volumique absolue du ciment sont réalisées selon les modalités de la norme NA 231.

- **Essais chimique :** l'analyse élémentaire ciment par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme NA 230.

La détermination de la perte au feu est réalisée selon les modalités de la norme NA 5042.

La détermination des insolubles est réalisée selon les modalités de la norme NA 5042.

La détermination de la teneur des chlorures sur ciment est réalisée selon les modalités de la norme NA 5042.

La détermination de la teneur en anhydrite sulfurique (SO₃) est réalisés selon les modalités de la norme NA 5042.

Le dosage de la chaux libre est réalisé suivant les modalités de la méthode PT207 CERILH 1970.

IV.1.3 Résultats des essais physiques

Le tableau suivant représente les résultats des essais physiques du ciment.

Tableau IV.6. Résultats des essais physiques.

		Résultats
Consistance normalisée (%)	H2O	27.6
Temps de prise (mn)	Début	115
	Fin	245
Stabilité (mm)	Froid	—
	Chaud	0.0
Masse volumique absolue du ciment (g/cm ³)		3.08
Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)		3764

IV.1.4. Résultats des essais mécaniques :

Le tableau suivant représente les résultats des essais mécaniques sur ciment.

Tableau IV.7. Résultats des essais mécaniques.

Masse totale au démoulage de 6 éprouvettes (g)		3476.6
Échéance en jour	Flexion (N/mm ²)	Compression (N/mm ²)
02 jours	4.8	23.4
28 jours	8.3	51.4

IV.1.4. Résultats des essais chimiques :

Le tableau suivant représente les résultats des essais chimiques sur ciment.

Tableau IV.8. Résultats des essais chimiques.

Compositions chimique	Teneur (%)
SiO ₂	20.16
Al ₂ O ₃	4.68
Fe ₂ O ₃	4.19
CaO	64.39
MgO	1.15
K ₂ O	0.51
Na ₂ O	0.16
SO ₃	2.26
CaO libre	1.342
Cl	< 0.010
Ins.	3.18
P.F	2.140
CO ₂	1.04

IV.1.5. Résultats des essais minéralogiques :

Le tableau suivant représente les résultats des essais minéralogiques sur ciment.

Tableau IV.9. Résultats des essais minéralogiques.

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker (%)
CLINKER	C3S	57
	C2S	21
	C3A	04
	C4AF	15
	CaOL	< 02
Régulateur de prise	Gypse	04

Présence d'autres formes de cristaux non identifiés < 2%

Ajout	Pouzzolane (p)	04
--------------	-----------------------	-----------

Commentaire :

Le ciment analysé par nos soins, portant le code CM 2200373 est un ciment portland résistant aux sulfates, dont les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments.

CEM I 42.5 R-SR3 selon la norme en vigueur

IV.2 Préparation des éprouvettes :

IV.2.1 Introduction :

Quatre échantillons d'argile sont préparés par réaliser cette étude, l'objectif essentiel basé sur la substitution d'une quantité de ciment par ces argiles sans et avec traitement thermique, une série de caractérisation nous a permis de contrôler la composition chimique et minéralogique, ainsi les propriétés physico-mécaniques de mélange argile-ciment.

IV.2.2 Matériaux d'étude :

IV.2.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment de type CEM I, composé de 60.92 % de silicate tricalcique (C_3S), 6.06% de silicate bicalcique (C_2S), 8.29 % aluminat tricalcique (C_3A), et 9.25 % d'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF) ; la composition chimique selon la norme NF EN 196-4 est présentée dans le tableau suivant.

Tableau IV.10. Composition chimique du ciment

Oxyde	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
Teneurs	0,17	1,58	5,07	19,96	0,11	2,45	0,75	63,39	0,23	0,03	3,04

IV.2.2.2 Adjuvant

L'adjuvant utilisé dans ce travail est un produit employé par Sika, sous le nom **SIKA VISCOCRETE TEMPO 544** : il s'agit d'un superplastifiants haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylates modifiés. Conforme à la norme NF EN 934-2.

La notion technique du produit donne les propriétés suivantes :

- AspectLiquide Marron.
- Densité.....1.07±0.01.
- PH.....5±1.
- Teneur en Na₂OEq≤1%.
- Teneur en ions Cl⁻.....≤0.1%
- Extrait sec32±1.2%

La plage d'utilisation recommandée varie de 0.5 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. La plage d'utilisation usuelle est de 0.6 à 1.5% du poids du ciment ou du liant, dans notre travail nous avons utilisés un dosage de 1% de la masse de liant équivalent.

IV.3 Argile :

Dans cette étude, quatre argiles ont été utilisés, ils proviennent de refus industriels de gisement, ces argiles sont différenciées et codées comme suivant : 2 RGC-IMY-Cyclone, 10 RGC-IMY-Cyclone, 5 RGC-IMY-Sand et RGC-IMY Goverseth Mag

IV.3.1 Caractérisation des argiles

IV.3.1.1 Morphologie

La microscopie électronique à balayage est basée sur l'interaction entre un faisceau d'électron et une matrice cristalline ou non. Le faisceau d'électrons secondaires ou celui des électrons rétrodiffusés est utilisé pour obtenir une image de l'échantillon irradié avec une résolution de l'ordre de 0.01 micron, cette technique donne des informations sur le relief de l'échantillon, la morphologie des grains et leur agencement. Une option supplémentaire basée sur le spectre de dispersion en énergie (EDAX) donne une information semi-quantitative sur le contenu chimique.

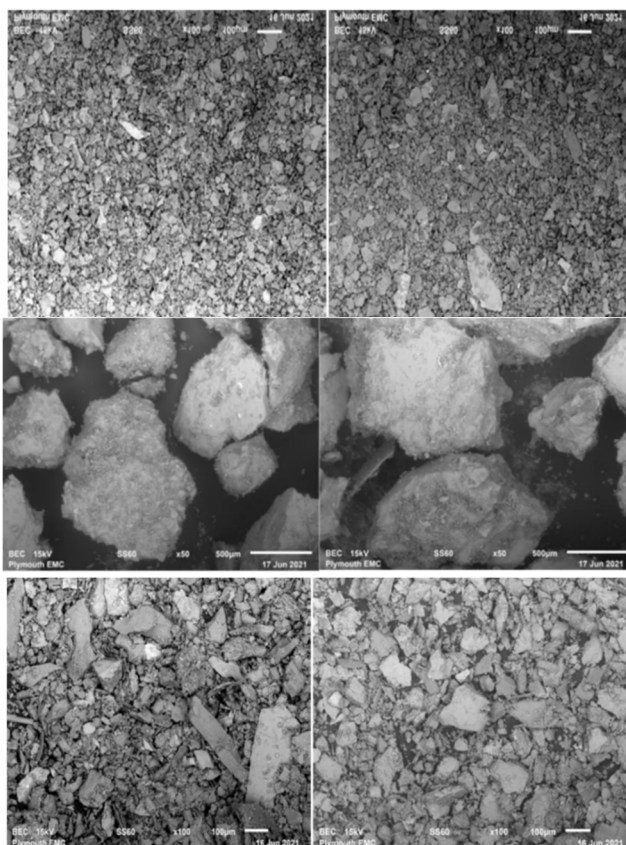


Figure IV.12. Image MEB des argiles : a. 2- RGC, b. 10-RGC, c. RGC-IMY-Sand.

Les résultats ont montré que tous les échantillons de poudre ont des formes non uniformes et irrégulières avec des tailles de particules différentes.

L'observation microscopique a été réalisée par voie environnemental dite ESEM (sans métallisation), dans des conditions de vide réduit à l'aide d'un microscope électronique à balayage de type Quanta 250 (FEI) doté d'un filament de tungstène comme une source d'électron, l'énergie de faisceau pour générer les électrons est de 15 kV et une résolution de 100 μm .

La forme des particules joue un rôle important en termes de degré de réactivité (la surface la plus élevée, la meilleure particule réactive) et a une influence directe sur la maniabilité du mélange, donc sur la résistance du produit final. Dans ce cas, un processus d'activation mécanique sera efficace pour augmenter le degré de réactivité de la poudre lorsqu'elle est utilisée dans les systèmes mélangés.

IV.3.2.2 Distribution granulométrique

Cette analyse est réalisée par granulomètre laser Mastersizer 2000 (mode sèche), mesurant la taille des particules sur une gamme de 0.02 μm à 2 mm.

La distribution granulométrique est déduite de l'interaction entre un ensemble de particules et le faisceau laser incident par l'analyse de la tache de diffraction du faisceau, avec son logiciel intuitif et son ergonomie, La gamme Mastersizer permet aux utilisateurs de réaliser ces mesures de granulométrie rapidement et facilement.



Figure IV.13. Granulomètre laser Metasizer 2000

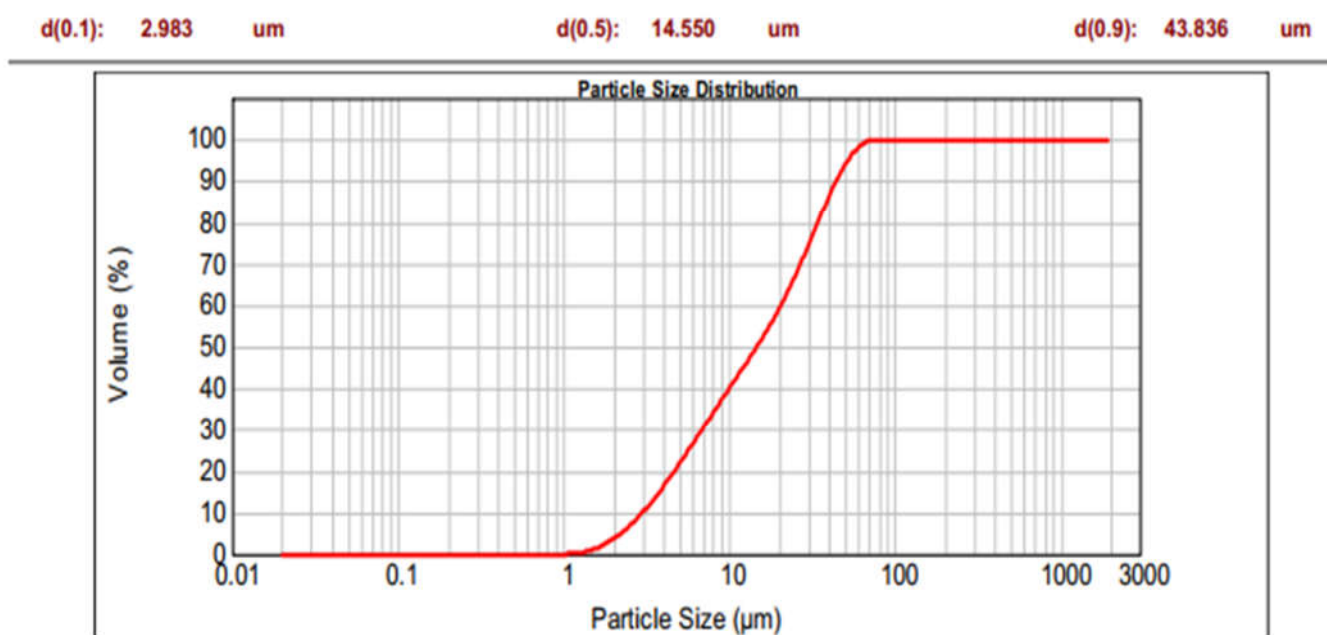


Figure IV.14. Courbe cumulative de l'argile RGC imy sande

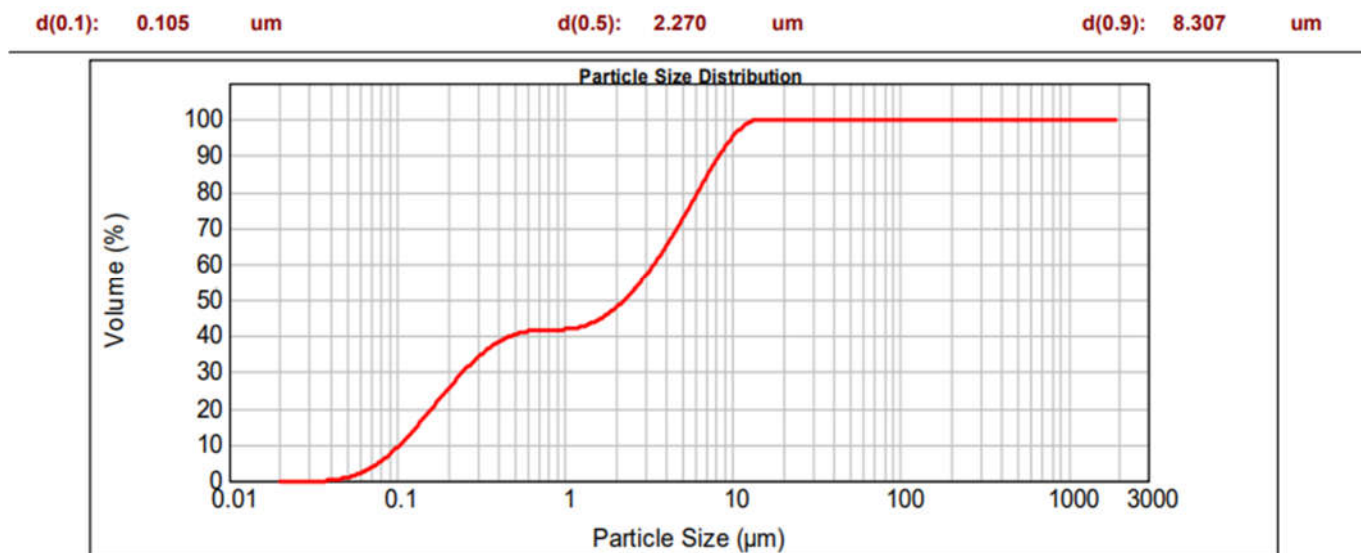


Figure IV.15. Courbe cumulative de l'argile RGC-MAG

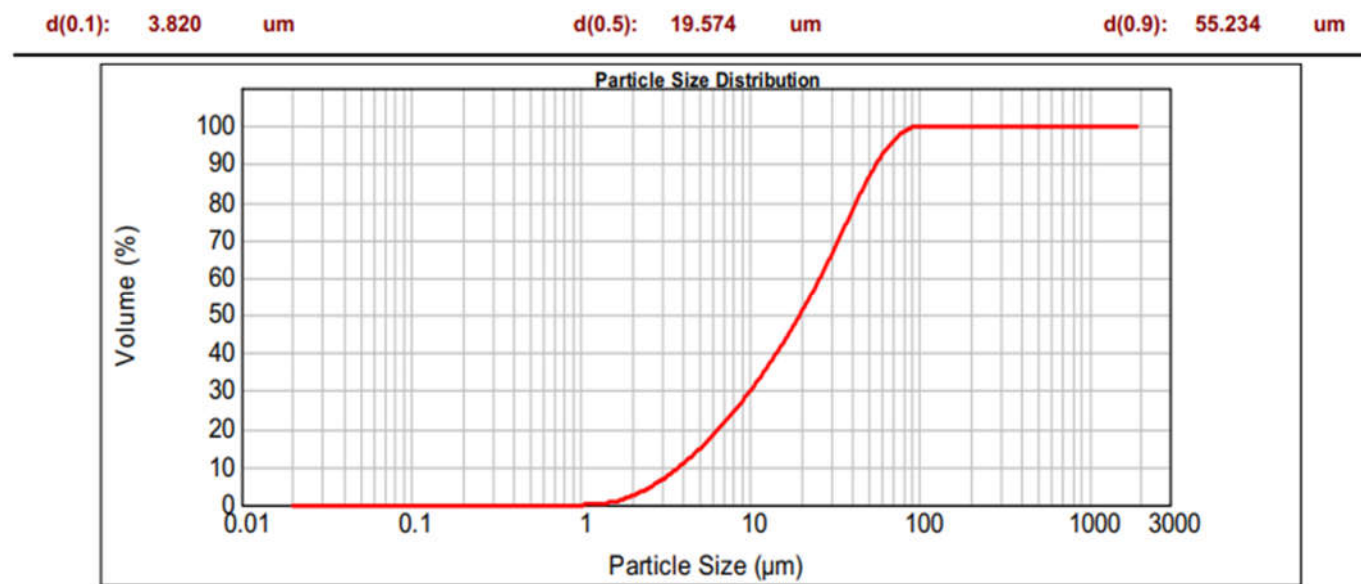


Figure IV.16. Courbe cumulative de l'argile 10-RRG imy sande

d(0.1): 2.983 um

d(0.5): 14.550 um

d(0.9): 43.836 um

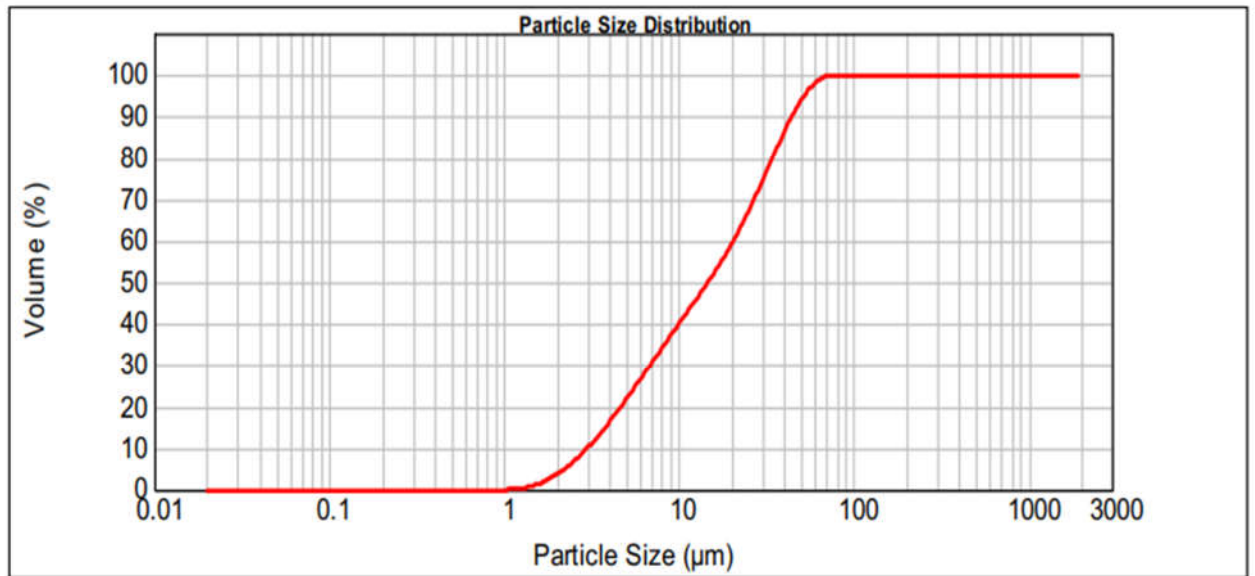


Figure IV.17. Courbe cumulative de l’argile 10-RRG imy sande

Tableau IV.11. Propriétés granulométriques des argiles

L'échantillon	d ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	C.U (D ₆₀ /D ₁₀)	Surface spécifique
10 RGC IMY	3,820	19,574	55,234	0,824	0.615 m ² /g
2 RGC IMY	4,278	14,475	33,093	0,611	0.638 m ² /g
RGC IMY GO	0,105	2,270	8,307	1,21	19.300 m ² /g
RGC SAND	2,983	14,550	43,836	0,9	0.792 m ² /g

IV.3.3. Masse volumique

La masse volumique est un paramètre physique elle nous permet d’voire des informations sur la masse d’un échantillon ou d’un corps devisé par son volume, la masse volumique est représenter par le symbole (ρ), on utilise aussi. La masse volumique absolue est déterminée en utilisant le densimètre de Le Chatelier pour déterminer la masse volumique absolu de l’échantillon

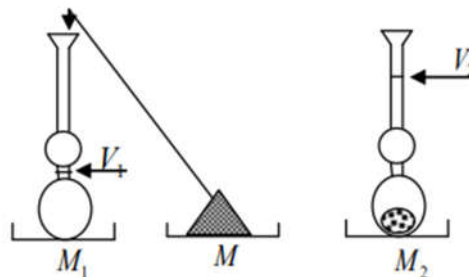


Figure IV.7 Mesure de la masse volumique

La masse volumique absolue est donnée par :

$$\rho_{\text{abs}} = (M2 - M1) / (V2 - V1)$$

Où : M1 : Masse de (cellule + benzène).

M2 : Masse de (cellule + benzène + ciment).

V1 : Le volume du benzène initial.

V2 : Le volume du benzène final (après introduction du ciment).

Tableau IV.12. Masse volumique des argiles

Nom d'échantillon	La masse volumique ρ (g /cm ³)
RGC-IMY-SAND	2,690
RGC-IMY-GOVERSETH	2,680
2'RGC-IMY-CYCLONE	2,657
10'RGC-IMY-CYCLONE	2,709

IV.3.4 Surface spécifique de Blaine

La surface spécifique permet de déterminer la finesse du ciment, argile ; Qui est une caractéristique importante, La finesse d'un ciment est exprimée par sa surface spécifique qui exprime la surface étendue des grains de l'unité de masse du ciment. Elle est généralement exprimée en cm²/g

La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique est la perméabilité à l'air « Méthode de Blaine » selon la modalité de la norme NF EN 196-6. Basée sur la mesure de temps de passage d'un volume d'air connu à travers la poudre à analyser. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. L'appareil utilisé dans cet essai est appelé Appareil Blaine figure, comme indique la figure XX

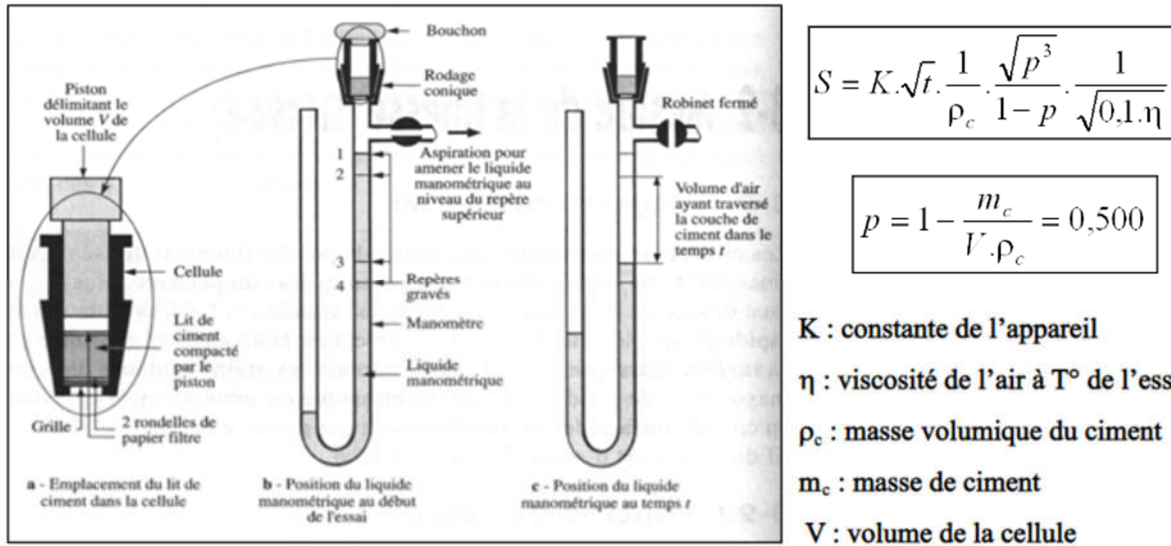


Figure IV.18. Principe de mesure de l'SSB



Figure IV.19. Banc d'essai SSB.

Tableau IV.13. Surface spécifique de Blaine

Nom d'échantillon	La masse volumique ρ (g /cm ³)	Surface spécifique du Blaine (cm ² /g)
RGC-IMY-SAND	2,690	3792
RGC-IMY-GOVERSETH	2,680	5602
2'RGC-IMY-CYCLONE	2,657	5339
10'RGC-IMY-CYCLONE	2,709	3186

Comparaissant les résultats de la surface spécifique de Blain avec celle déterminée par granulométrie laser, un écart important est observé, le sens de finesse est généralement le même, par contre, les valeurs ne sont pas en cohérence, notons dans ce sens que l'étalonnage de l'SSB est réaliser par rapport un ciment dite étalon, alors que les poudre testé ne sont pas des ciment, dans ce cadre, la tendance actuelle s'envers vers les résultats de granulométrie laser, car cette technique basée sur l'interaction rayonnement laser-poudre ne nécessite pas des paramètres qui peut être perturbés par plusieurs facteurs tale que l'humidité, la température, facteurs humaines.

Tableau IV.14. Valeurs de surface spécifique par Blaine et par laser

Nom d'échantillon	Surface spécifique du Blaine (cm ² /g)	Surface spécifique par granulométrie laze (cm ² /g)
RGC-IMY-SAND	3792	7920
RGC-IMY-GOVERSETH	5602	193000
2'RGC-IMY-CYCLONE	5339	6380
10'RGC-IMY-CYCLONE	3186	6150

IV.3.5 Essai de Bleu de méthylène

L'essai bleu de méthylène également appelé essai au bleu il est utilisé pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat d'une sole généralement, cet essai permet a mesuré la capacité d'adsorption du bleu de méthylène de la fraction argileuse d'un échantillon. Le bleu de méthylène est préférentiellement absorbé par les argiles gonflantes du type montmorillonites et les matières organiques, par contre les autres comme kaolinite, illite sont peu sensible au bleu.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante

➤ **Appareillage**

L'appareillage à utiliser est le suivant :

Une burette, papier-filtre, une tige de verre, un agitateur à ailettes, capable de vitesse de rotation contrôlés variables peuvent atteindre 600tr/min avec 3 ou 4 ailettes de 75mm de diamètre, une balance, un chronomètre, une spatule, un bécher d'une capacité d'environ 1à2l, une fiole d'une capacité de 1l.



Figure IV.20. Banc d'essai SSB



Figure IV.21. Essai de bleu de méthylène

➤ **Les résultats de cette l'essai :**

Le calcul de la valeur de bleu de méthylène (MBF) en grammes de colorant par kg de fraction 0/0.125mm suivant :

$$M_{bf} = V/M * 10$$

M : la masse de la prise d'essai, en grammes

V : le volume total de solution colorée ajoutée, en millilitres.

Tableau IV.15. Valeurs de bleu de méthylène

Noms des échantillons	M _{BF} (g /kg)
RGC-IMY-SAND	3.3
RGC IMY-GOVERSETH	15
2'RGC-IMY-CYCLONE	3,3
10 RGC-IMY-CYCLONE	6,67

Excepté l'échantillon RGC IMY-GOVERSETH, les autres échantillons présentent des valeurs inférieures à 10 g/kg, ce qui montre que ces produits sont propres et ne contiennent pas des argiles gonflantes et des produits néfastes pour le ciment.

Concernant l'échantillon RGC IMY-GOVERSETH, la valeur élevée de bleu montre qu'il existe des argiles non stables vis-à-vis l'action de l'eau, ce qui nécessite un traitement thermique pour neutraliser ce problème.

IV.4 Composition chimique

La composition chimique des argiles fait l'objet d'étude est déterminée par analyse spectrophotométrie de fluorescence X (FRX), cette méthode d'émission atomique consiste à générer d'irradiation par un faisceau de rayons X primaire depuis un tube à rayons X, ce qui provoque l'émission de rayons X fluorescents dotés d'énergies discrètes caractéristiques des éléments présents dans l'échantillon cette énergie se manifeste sous forme des longueurs d'ondes et d'intensité différentes de la lumière des rayons X émise par les atomes énergisés de l'échantillon. L'énergie associée à cette relaxation est unique pour chaque atome si bien que la mesure permet d'identifier l'atome émetteur.

Tableau IV.16. Composition chimique des argiles avant et après traitement thermique

Sans traitement thermique												
Taux (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	P. F	Somme
10 RGC-IMY-CYCLONE	56,98	27,53	1,93	0,18	0,37	0,01	6,42	0,58	0,16	0,26	5,57	100
2RGC-IMY-CYCLONE	52,50	31,62	1,98	0,05	0,39	0,01	5,35	0,32	0,05	0,16	7,57	100
RGC-IMY-GOVERSETH MAG	45,54	36,90	1,87	0,09	0,45	0,01	3,09	0,13	0,29	0,12	11,51	100
RGC-IMY-SAND	74,05	15,24	2,12	0,26	0,37	0,01	4,91	0,39	0,08	0,30	2,27	100
Traitement thermique à 700°C												
10 RGC-IMY-CYCLONE	<i>61,86</i>	<i>26,79</i>	<i>2,02</i>	<i>0,23</i>	<i>0,24</i>	<i>0,01</i>	<i>6,61</i>	<i>0,66</i>	<i>0,30</i>	<i>0,32</i>	<i>0,96</i>	100
2RGC-IMY-CYCLONE	<i>57,69</i>	<i>32,21</i>	<i>2,03</i>	<i>0,070</i>	<i>0,25</i>	<i>0,01</i>	<i>5,56</i>	<i>0,37</i>	<i>0,07</i>	<i>0,20</i>	<i>1,53</i>	100
RGC-IMY-GOVERSETH MAG	<i>53,01</i>	<i>39,44</i>	<i>1,99</i>	<i>0,16</i>	<i>0,30</i>	<i>0,01</i>	<i>3,34</i>	<i>0,19</i>	<i>0,57</i>	<i>0,16</i>	<i>0,83</i>	100
RGC-IMY-SAND	<i>73,19</i>	<i>17,05</i>	<i>2,30</i>	<i>0,37</i>	<i>0,27</i>	<i>0,01</i>	<i>5,27</i>	<i>0,42</i>	<i>0,12</i>	<i>0,39</i>	<i>0,62</i>	100
Traitement thermique à 850°C												
10 RGC-IMY-CYCLONE	<i>*61,14</i>	<i>27,59</i>	1,94	0,21	<i>0,24</i>	<i>0,01</i>	6,502	0,60	0,28	<i>0,30</i>	<i>1,18</i>	100
2RGC-IMY-CYCLONE	<i>*56,74</i>	<i>*31,76</i>	2,02	0,07	<i>0,25</i>	<i>0,01</i>	5,55	0,35	0,07	<i>0,18</i>	<i>2,99</i>	100
RGC-IMY-GOVERSETH MAG	<i>*52,50</i>	<i>*39,09</i>	1,98	0,14	<i>0,30</i>	<i>0,01</i>	3,34	0,18	0,57	<i>0,16</i>	<i>1,72</i>	100
RGC-IMY-SAND	<i>*75,81</i>	<i>14,88</i>	<i>2,09</i>	0,30	0,24	<i>0,01</i>	4,82	0,41	0,12	<i>0,34</i>	<i>0,99</i>	100

D'après le tableau, nous constatons que les échantillons analysés sont pauvres de calcaire, riche en silice, puis en alumine, ces composants principales nous informent que l'activation possible est une activation pouzzolanique, l'existence d'alumine doit être pris en considération pour vérifier le gonflement et la formation de minéraux transitoires lors et après d'hydratation.

Le traitement thermique modifier les teneurs des différentes oxydes, excepté de MgO dans le cas de 700°C, l'augmentation observée est explicable par l'effet des pertes au faux (P.F) sur la composition (règle de trois), exceptionnellement MgO pour les quatre échantillons, et Al₂O₃ pour l'échantillon 10 RGC.

Un traitement de 850°C montre qu'il y a une possibilité de transformation polymorphique pour les échantillons RGC-IMY-SAND et MAG

IV.5 Composition minéralogique

Les composants minéralogiques sont déterminés par diffraction des Rayons X (DRX), cette technique de caractérisation est utilisée pour des matériaux cristallisés, qu'ils soient massifs, sous forme de poudre ou de dépôts. Très souvent appliquée aux matériaux inorganiques : minéraux, métaux, alliages, céramiques.

Le principe consiste à appliquer une différence de potentiel à travers le tube générateur des Rayons X, les faisceaux de Rayons X produits par le tube sont envoyés sur l'échantillon dans lequel ils sont déviés par les atomes. Ces faisceaux diffractés interfèrent entre eux, conduisant à la production d'un signal intense dans certaines zones précises de l'espace. C'est ce signal qui est collecté par le détecteur, et tracé sous forme d'une courbe (diffractogramme) qui présente des pics à des angles bien spécifiques de diffraction. La position de ces pics est un indice de l'arrangement des atomes à l'intérieur d'un cristal (distance entre atomes, entre plans intracristallins). La relation empirique qui relie les angles auxquels sont observés les pics et les distances entre plans atomiques est la loi de Bragg.

La diffraction des rayons X permet de distinguer les phénomènes de polymorphisme, liés aux des produits ayant la même composition chimique mais dont les arrangements atomiques diffèrent. Par exemple, les carbonates de calcium comme la calcite et l'aragonite, de même formule chimique (CaCO_3), les silicate SiO_2 (quartz α , quartz β , tridymite et cristobalite) ont des diagrammes de diffraction différents.

En outre, les isomorphismes, c.-à-d. phases de nature chimique différente mais dont les atomes sont organisés selon le même arrangement présentent des pics de diffraction localisés aux mêmes positions angulaires.

L'identification des poudres se fait en deux étapes, la première étape consiste à comparer les pics obtenus avec ceux contenus dans une base de données qui comprend plusieurs centaines de milliers de fiches. Cette étape est suivie par une étape de validation (match) par l'utilisateur qui doit avoir une bonne connaissance de l'échantillon, afin de lever les ambiguïtés et les confusions.

La diffraction des rayons X repose sur l'enregistrement d'un diffractogramme et sur l'analyse des pics de ce diagramme qui permet de caractériser les cristallites présentes dans l'échantillon à partir des éléments suivants :

- ✓ Position des pics : analyse qualitative, identification de phases cristallines présentes

- ✓ Largeur des pics : taille et forme des cristallites, contraintes internes
- ✓ Intensité des pics : estimation de composition chimique, analyse quantitative, orientation préférentielle

La composition minéralogique avant traitement thermique est donnée dans le tableau suivante

Tableau IV.17. Composition minéralogique des argiles avant traitement thermique

Minéraux	2RGC-IMY-CYCLONE	10 RGC-IMY-CYCLONE	RGC-IMY-GOVERSETH MAG	RGC-IMY-SAND
Quartz	13	08	02	46
Kaolinite	38	38	65	11
Muscovite	41	30	26	24
Orthoclase	03	17	00	12
Albite	03	05	00	03
Montmorillonite	00	00	05	00
M. ferrugineux	02	02	02	02
Autres	00	00	00	02

Nous constatons ici que l'existence de kaolinite donne une possibilité de voir une activation pouzzolanique par traitement thermique, deux programmes de traitement sont programmés, le premier programme consiste à appliquer une température de 700°C durant 1 heures, le deuxième programme consiste à appliquer une température de 800°C.

Les diagrammes sont présentés sans et avec traitement à 700 et 850°C

a. RGC-IMY-GOVERSETH MAG

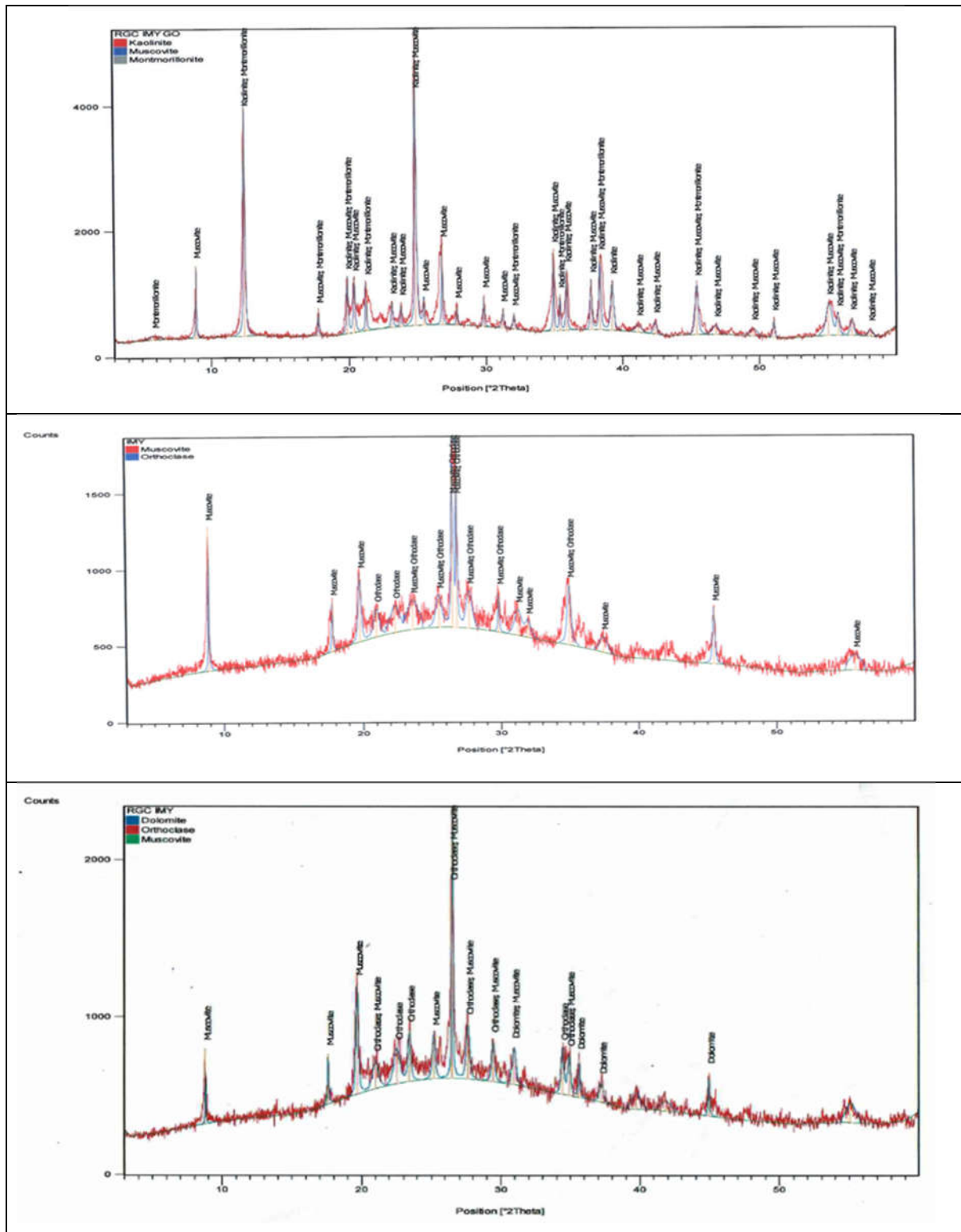


Figure IV.22. Diffractogramme d'argile RGC-IMY-GOVERSETH MAG à 0-700-850°C

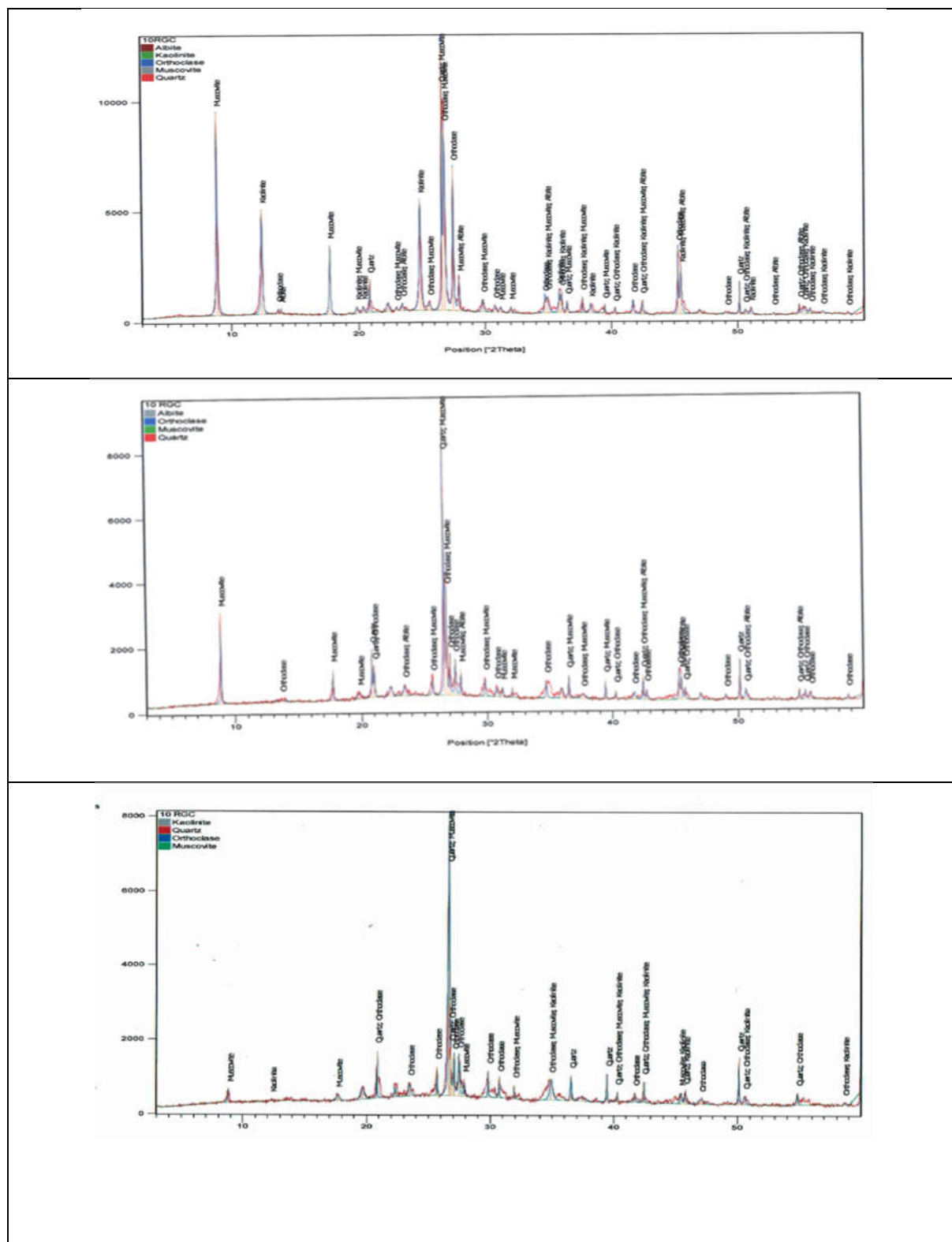


Figure IV.23. Diffractogramme d'argile 10-RGC à 0-700-850°C

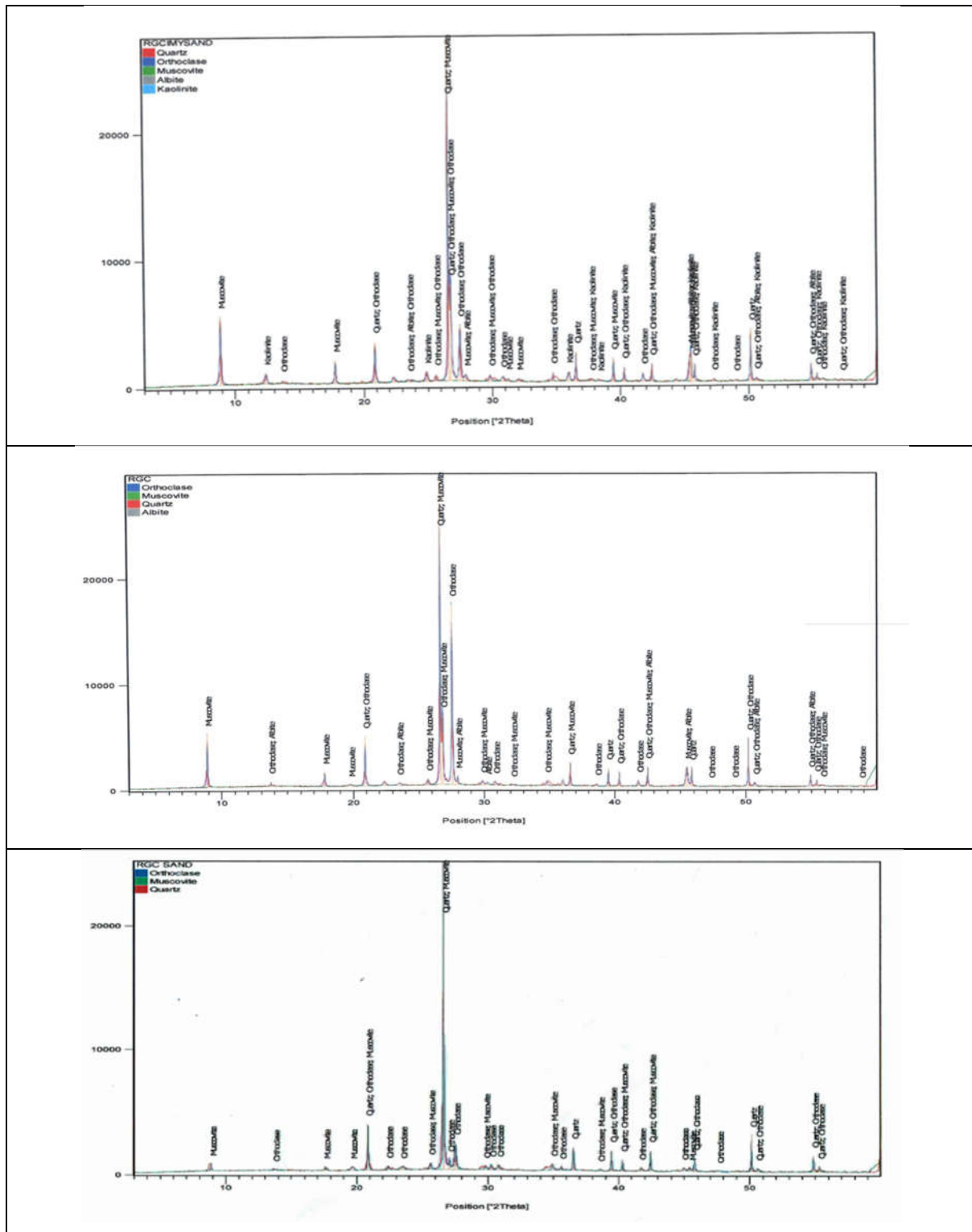


Figure IV.24. Diffractogramme d'argile RGC-IMY-SAND à 0-700-850°C

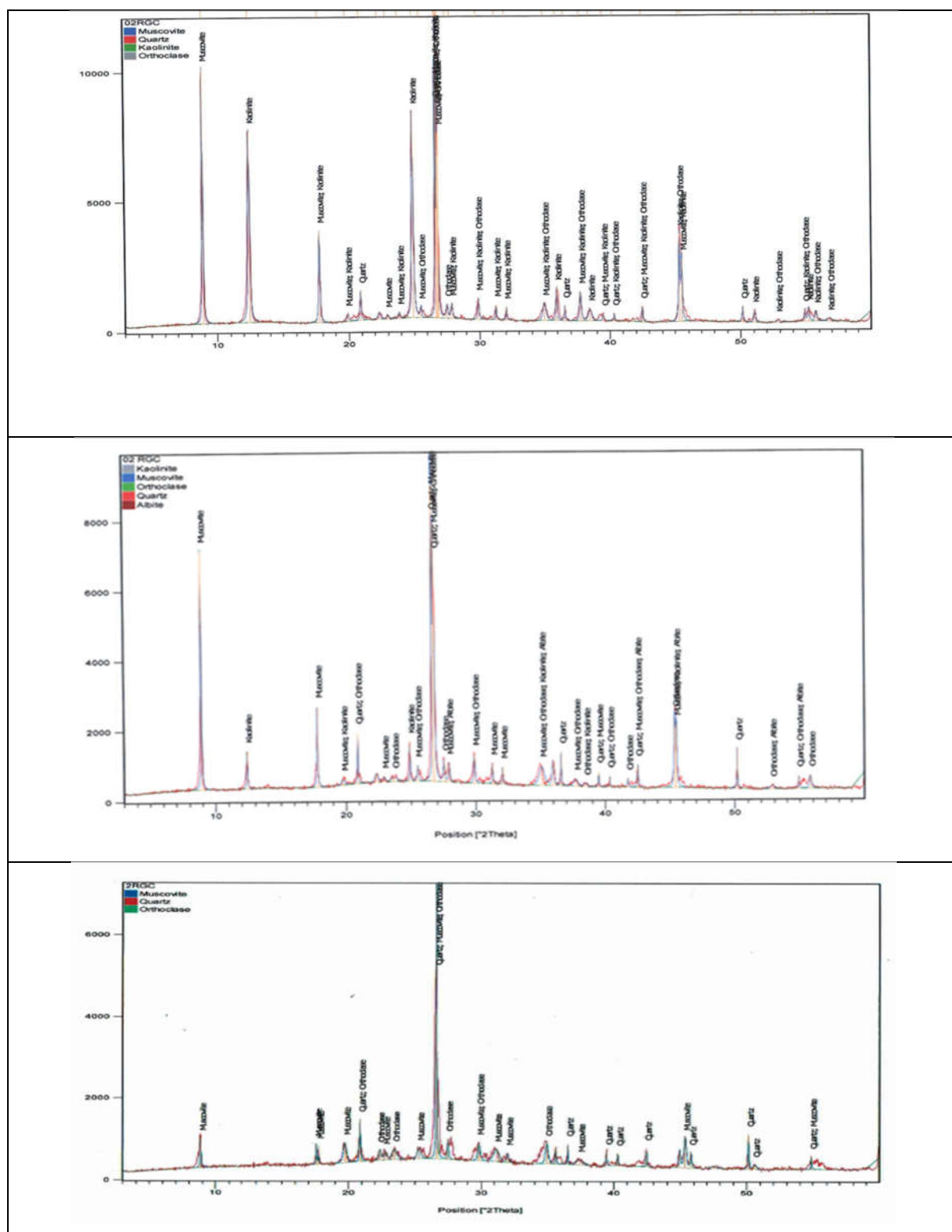


Figure IV.25. Diffractogramme d’argile 2-RGC-IMY-CYCLONE à 0-700-850°C.

L'identification des pics montre qu'il existe des transformations polymorphiques, la composition qualitative avant et après traitement thermique est présentée dans le tableau suivant :

Tableau IV.18. Variation de la composition minéralogique en fonction de températures

Minéraux	2RGC-IMY-CYCLONE			10 RGC-IMY-CYCLONE			RGC-IMY-GOVERSETH MAG			RGC-IMY-SAND		
	0°C	700	850	0	700	850	0	700	850	0	700	850°C
Quartz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓
Kaolinite	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	X
Muscovite	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Orthoclase	✓	✓	✓	✓	✓	✓	00	✓	✓	✓	✓	✓
Dolomite	X					X			✓	X		
Albite	✓	✓	X	✓	✓	X	00	X		✓	✓	X
Montmorillonite							X	X		00	X	
M. ferrugineux				✓			✓	X		✓	X	
Autres							00			✓	X	

Le traitement thermique influe sur le morphisme de la structure des argiles étudié, des transformation polymorphisme se manifeste par la disparition des minéraux comme le cas Kaolinite, quartz et Albite, et l'apparition dans d'autre cas comme l'Orthoclase dans RGC - COVERSETH à 700 et 850°C .

IV.6 Comportement rhéologique des coulis

Le comportement le plus simple est le comportement Newtonien qui a une relation linéaire entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement. La contrainte de cisaillement de ce fluide (par exemple eau).

L'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation est correctement décrite par le modèle de Bingham., seulement un seul point est exigé pour déterminer ce comportement du fluide. Cependant, la plupart des fluides sont des fluides non-newtoniens qui signifie de plus qu'un point est exigé de décrire leur comportement d'écoulement. La pâte de ciment, mortier et béton peuvent être décrits comme des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique. (Le seuil de cisaillement) la matière se comporte comme un solide mais s'écoule comme un liquide visqueux quand cette contrainte est dépassée

($\tau > \tau_0$). Le type le plus simple de ce comportement est le comportement linéaire de fluide Bingham.

Le comportement le plus simple est le comportement Newtonien qui a une relation linéaire entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement. La contrainte de cisaillement de ce fluide (par exemple eau) peut être décrite par (1)

$$\tau = \eta \dot{\gamma}'$$

La viscosité plastique est l'inclinaison de la ligne linéaire d'un fluide Bingham.

Dans beaucoup de cas le comportement de l'écoulement de pâte de ciment, mortier ou béton peut être exprimé par cette formule. Le seuil de cisaillement est une mesure de la force nécessaire à commencer un mouvement du béton (résistance d'écoulement), alors que la viscosité plastique est une mesure de la résistance du béton contre une vitesse augmentée de mouvement.

Cependant, les fluides n'exposent pas toujours de comportement de l'écoulement linéaire. Dans les tels cas les modèles non-linéaires comme le modèle de Herschel-Buckley peuvent être appliqués.

Afin de mis en évidence l'influence de ces argiles sur le comportement rhéologique des coulis de ciment différentes formulations sont confectionnées pour caractériser les propriétés rhéologiques des pâtes considérées, nous avons utilisé un rhéomètre AR2000 d'un système géométrie SV-DIN à vitesse imposée.



Figure IV.16 Rhéomètre AR2000

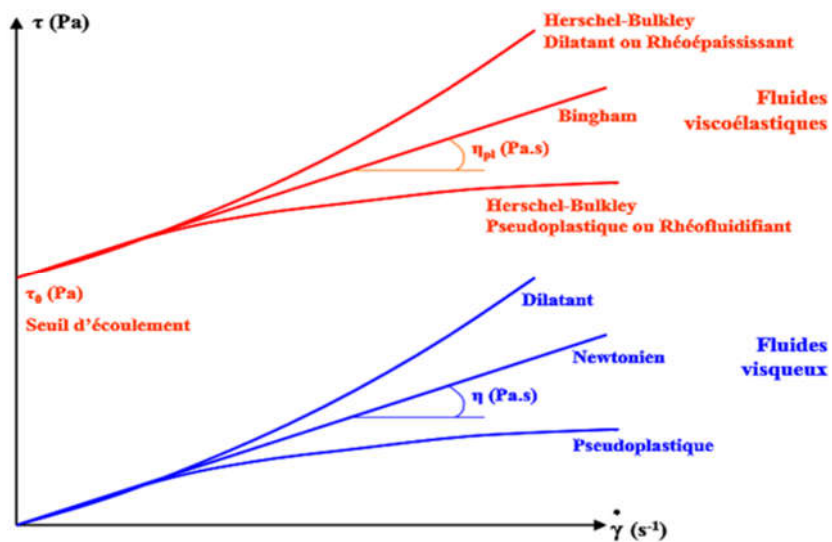


Figure 26 Différents types d'écoulement de la matière.

Tableau IV.19. Modèles de comportement rhéologique

Différents modèles rhéologiques	Équation caractéristique
Modèle de Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Modèle de Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$
Modèle d'Eyring	$\tau = a \sinh^{-1}(b\dot{\gamma})$

➤ **Choix de la géométrie**

Le choix de la géométrie de mesure dépend du rapport entre la dimension moyenne de l'entrefer et le diamètre des plus grosses particules. En pratique l'entrefer doit être supérieur à, au moins, dix fois la taille des plus grosses particules en suspension.

Toutefois, cette condition peut ne pas être suffisante et la nature du matériau à étudier doit être prise en compte

La géométrie choisie pour les essais sur les superplastifiants est très souvent de type cône – plan comme indique la figure, dans ce cas, lorsque l'angle α de l'entrefer est petit ($< 4^\circ$), la relations entre la vitesse angulaire de rotation « Ω » et le gradient de vitesse « $\dot{\gamma}$ » d'une part, entre le couple M et la contrainte « τ » d'autre part sont donnée par :

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\alpha} \Omega$$

$$\tau = \frac{3}{2\pi R^3} M$$

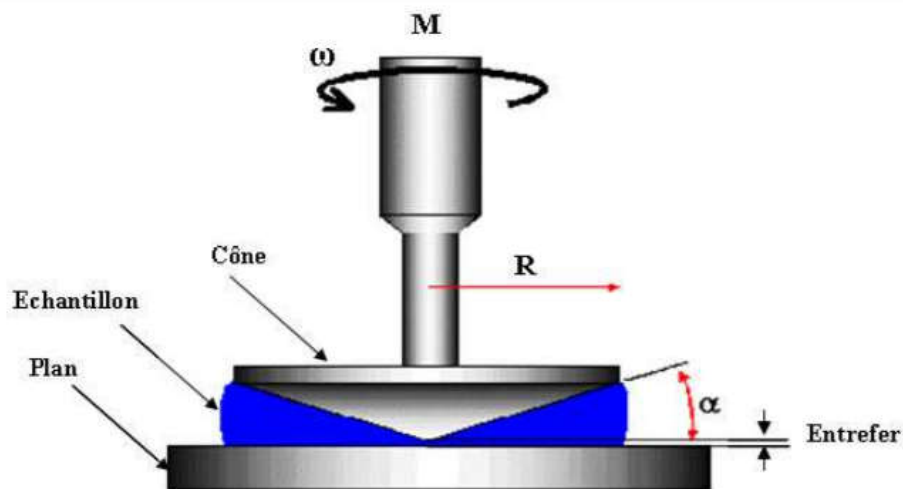


Figure IV. 18 Géométrie con-plan

➤ **Formulation des coulis de ciment**

Un coulis de ciment comme témoins a été préparé à partir de 100g de CEM I et un dosage en eau de 50%, les autres formulations sont obtenues par addition de 10, 20 et 30 g de différents types d'argile traités à 850°C, d'autre formulation de 30 g d'argile sans traitement avec 100g de CEM I est aussi testés pour voir l'effet thermique

IV.6.1 Mode opératoire

- Peser 100g du ciment ;
- Peser les différentes quantités d'argile traité (10, 20 et 30g)
- Peser 30g d'argile non traité
- Préparer une quantité d'eau équivalentes à un rapport E/l=0.5) ;
- Mélanger les différentes formulations avec l'eau et l'adjuvant pendant au moins 5 minutes
- Mettre une certaine quantité de ce mélange dans le cylindre de rhéomètre ;
- Lancer le programme de mesure avec l'interface de logicielle Trios. Ensuite en applique une plage contrainte imposé qui traduit par une contrainte de cisaillement allant jusqu'à 500 S^{-1} , on obtient comme résultats d'output la contrainte, cette opération est répétée en augmentant la température à 20°C , puis à 30°C , les résultats sont présentés graphiquement comme indique la figure ci-après :

Une goutte de super plastifiant été placée dans l'appareil avant de démarrer les mesures, la température est réglée à 10°C . Ensuite en applique une plage contrainte imposé qui traduit par une contrainte de cisaillement allant jusqu'à 700 S^{-1} , on obtient comme résultats d'output la viscosité et la contrainte, les résultats sont présentés graphiquement comme indique la figure ci-après :

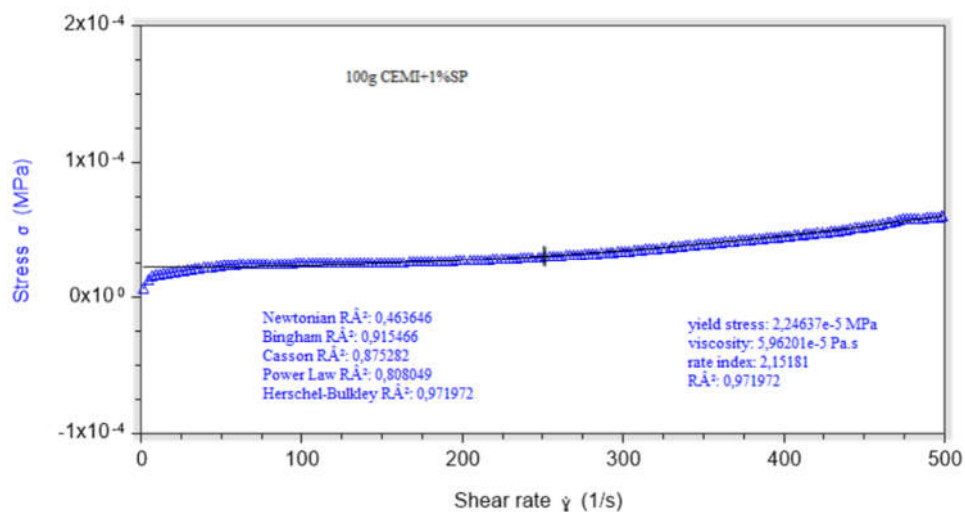


Figure IV.19. Rhéogramme de contrainte en fonction de vitesse de cisaillement- coulis de référence

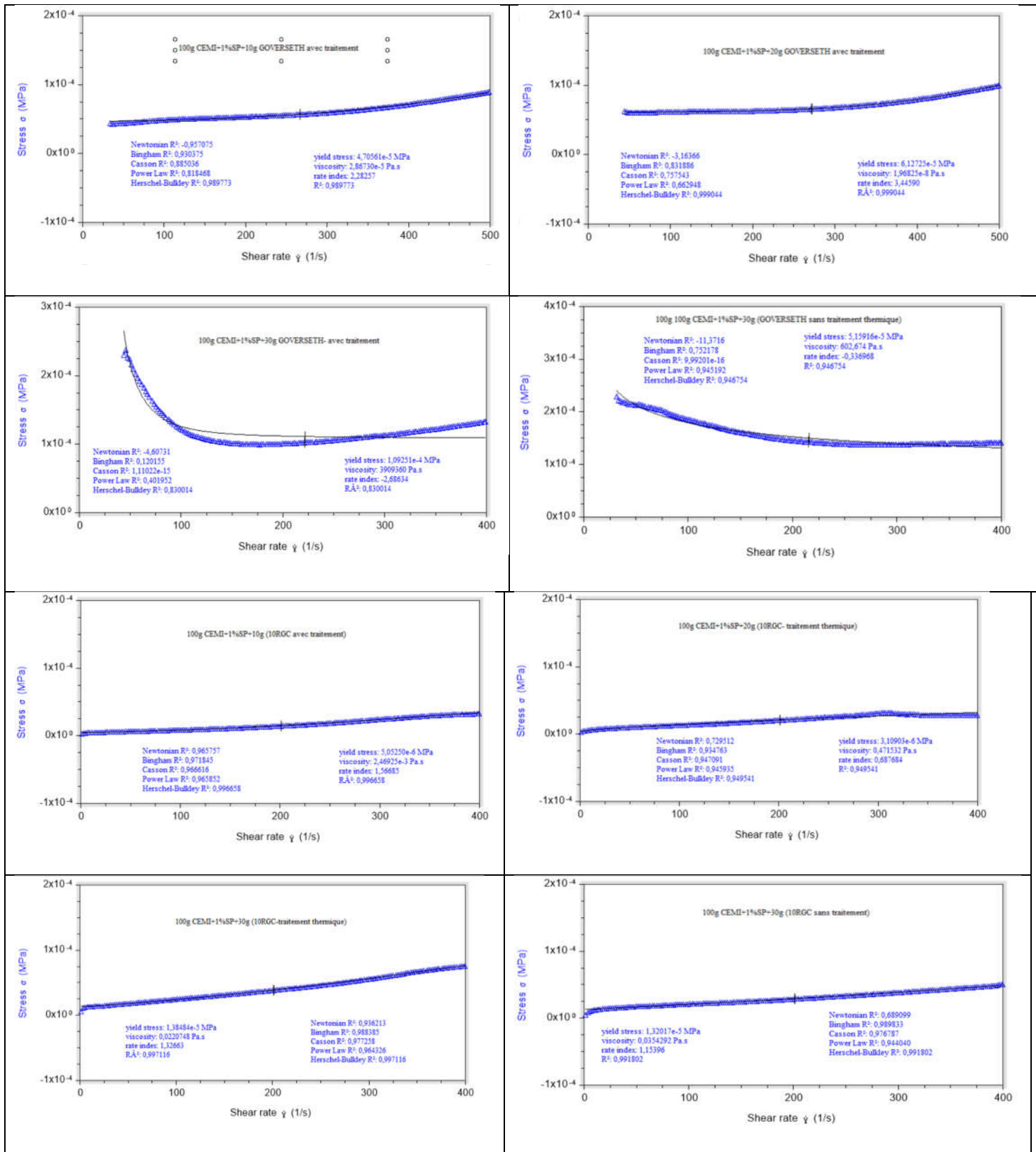


Figure IV.20 Rhéogramme de contrainte en fonction de vitesse de cisaillement des coulis Goverseth et 10-RGC

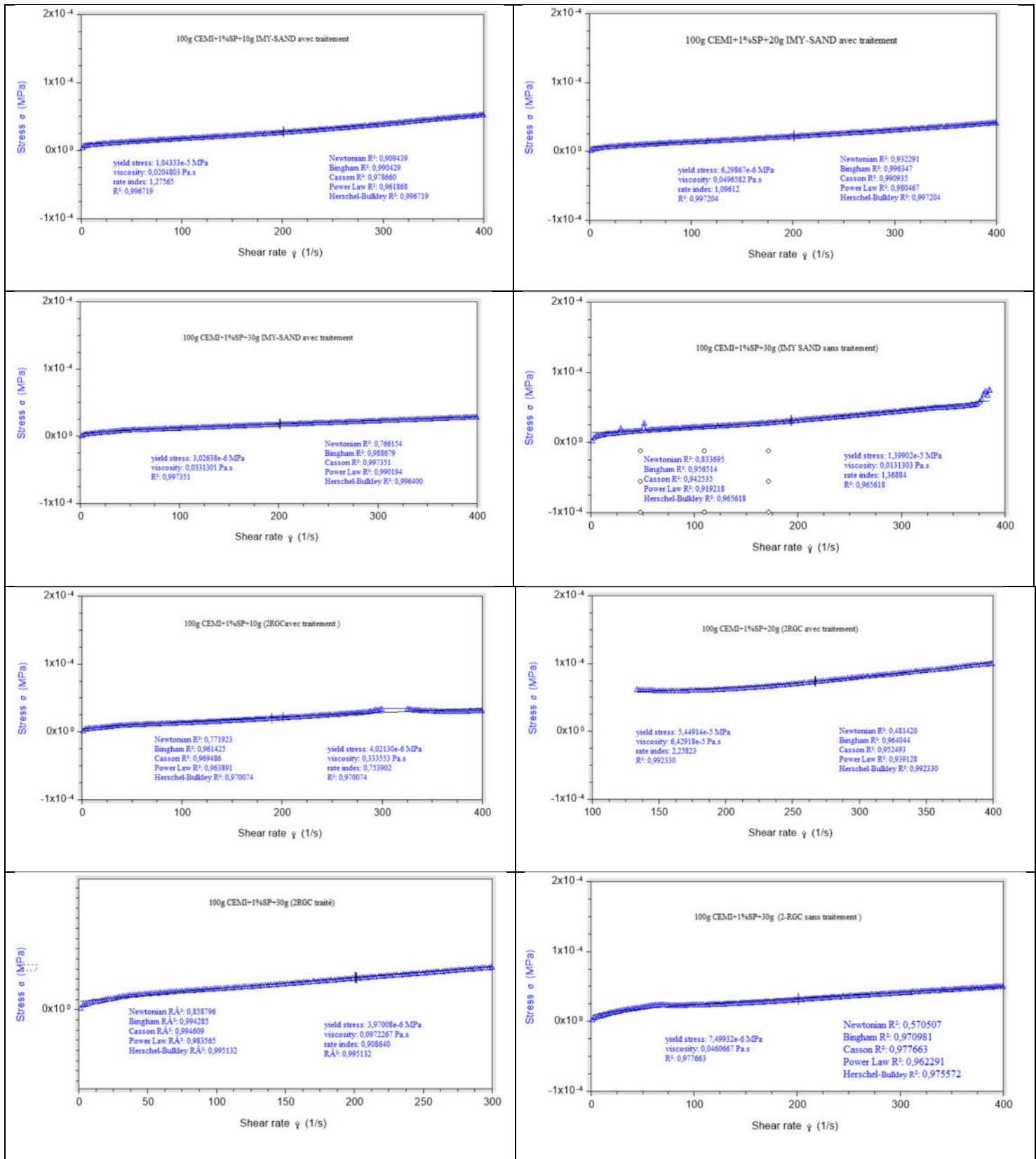


Figure IV.21. Rhéogramme de contrainte en fonction de vitesse de cisaillement des coulis IMY-SAND et 2-

ZRGC

L'étude de modélisation de comportement rhéologique s'effectue entre une plage de 20 à 400 (1/S), pour rapprocher les conditions réelles de malaxage et de mis en œuvre, les différentes formulations sont testées dans les mêmes conditions afin de discuter l'influence de taux d'incorporation sur les paramètres de modèle de comportement rhéologique, sachant que le dosage de superplastifiant est fixé à 1% de la masse du ciment

Le modèle d'hechel-bulkly est généralement adopté pour décrire l'équation phénomologique de l'évolution de la contrainte en fonction de vitesse de cisaillement dans le cas des pâtes cimentaires, le tableau ci-après, présente l'influence de taux de superplastifiant sur les indices de modèle.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que :

- ✓ L'argile RGC-IMY-GOVERSETH MAG traité thermiquement n'influe pas sur le modèle de comportement, par contre un dosage de 30% sans traitement thermique permet de changer la tendance vers un coulis rhéofluidifiant ;
- ✓ L'argile 10-RGC-IMY-GOVERSETH MAG rendre le coulis rhéofluidifiant pour 20%, au-delà, le comportement est rhéoépaississant ;
- ✓ Un dosage de 30% de 2-RGC sans et avec traitement thermique permet de fournir un comportement rhéofluidifiant

IV.7 Formulation de colis de ciment

Le colis de ciment Qu'on a préparé Est un mélange du ciment, d'eau et 30 % des charges qui sont les quatre argiles (2'' RGC-IMY-Cyclone, 10'' RGC-IMY-Cyclone, 5'' RGC-IMY-Sand, RGC-IMY Goverseth Mag) Avant et après le traitement thermique, avec le rapport E/C égale à 0,5 et 1% de superplastifiant.

– Matériel utilisés

- Un malaxeur a deux Vitesse : Lente et rapide
- une balance précise au gramme
- Des moules pour éprouvettes de 4*4*16

– Mode opératoire

Au début on a préparé un témoin avec 400 g de ciment et 200 g d'eau plus 1g de superplastifiant. Par la suite on a préparé des colis de ciment avec un pourcentage des quatre charges (30 %) ou 120g de chaque charge traitée et non traitée, ce mélange est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme.

Introduire l'eau (260 ml) avec 1g de superplastifiant en premier dans la cuve du malaxeur ; y verser ensuite le ciment ; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30 s de malaxage introduire régulièrement la charge les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires. 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 en le repoussant vers le milieu de celui-ci. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.



Figure IV.22 Malaxage et confection des éprouvettes

Tableau IV.20. Résultats de flexion et compression de témoin

	Flexion		Compression					
	Force (KN)	Contrainte (MPa)	Force	Contrainte	Force	Contrainte	Force moyenne (KN)	Contrainte moyenne (MPa)
Ciment témoin	1.5	3.4	58.1	36.3	53.2	33.3	55.65	34.8

Tableau IV.21. Résultats de flexion et compression coulis à base d'argile sans traitement

	Flexion	Compression
--	---------	-------------

Charges	Force (KN)	Contrainte (MPa)	Force (KN)			Contrainte (MPa)		
			1	2	Moy	1	2	Moy.
IMY SAND	1,5	3,5	84,8	53,5	69,15	53	33,4	43,2
10 RGC CYCLONE	1,7	4	46,5	53	49,75	29	33,1	31,05
2 RGC	2	4,7	49,7	52	50,85	31,1	32,5	31,1
GOVER SETH	2,4	5,6	49,1	35,9	42,5	30,7	22,4	26,55

Tableau IV.22. Résultats de flexion et compression coulis à base d'argile avec traitement

Charges	Flexion		Compression					
	Force (KN)	Contrainte (MPa)	Force			Contrainte		
			1	2	Moy	1	2	Moy.
IMY SAND	0,6	1,4	59,3	68,3	63,8	37,1	42,7	39,9
10 RGC CYCLONE	2,3	5,4	56,5	67,7	62,1	35,3	42,3	38,8
2 RGC	1,6	3,9	79,1	89,8	84,45	49,4	56,1	52,75
GOVER SETH	0,6	1,4	62,9	58,7	60,8	39,3	36,7	38

D'après ces résultats, nous constatons que les argiles sans traitement diminuent la résistance à la compression, une finesse élevée d'argile (GOVER SETH) donne des résistances faibles, les écarts entre des deux parties de compression est important. Par contre, le traitement thermique donne des améliorations remarquables en termes de résistance à la compression

CONCLUSION GENERALE
ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générale

Cette étude est réalisée au sein du Centre d'Etude et Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction (CETIM) à Boumerdès, et au niveau de l'Unité de recherche matériaux, procédé et environnement UR-MPE de l'université de Boumerdes, dans le cadre de valorisation des ressources naturelle pour produire des liants minéraux à faible impact environnemental. Dans ce cadre, différentes analyses ont été réalisés sur quatre échantillons d'argile, les résultats trouvés permet de tirer les conclusions suivantes

- Le traitement thermique permet de remédier le problème des constituants instables vis-à-vis de l'eau
- Sans traitement thermique, les argiles ont un bleu de méthylène élevé provoque un comportement rhéofluidifiant, le traitement thermique permet de changer ce comportement.
- Les résultats des essais rhéologiques montrent qu'il a des améliorations (diminution de l'indice d'écoulement « n » par rapport a celui de ciment
- Les contraintes de seuil limité montre qu'il y a possibilité d'utiliser ces argiles comme fines dans la formulation des BAP
- Les résultats de confection des éprouvettes pour essai de traction montre qu'il y une possibilité d'aller vers un dosage de plus de 30% en masse de ciment

Recommandations

Le programme souligner au départ pour cette étude n'est pas respecté, des contraintes énormes sont rencontrés, plusieurs essais n'ont pas autorisé au niveau de CETIM, même pour les essais rhéologiques, le nombre des échantillons est limité par les responsables de l'unité de recherche UR-MPE.

Les résultats trouvés sont prometteurs en terme rhéologique et en termes de résistances, pour cela, nous recommandons de continuer cette étude et de réaliser les essais suivants :

- Chaleurs d'hydratation sur les différents coulis ;
- Continuité de l'étude rhéologique ;
- Continuité de l'étude de l'état durci (essai de compression) ;
- Etude de la microstructure des coulis après durcissement.

Références bibliographiques :

- [1] Le monde de génie civil, pratiquer le BTP facilement sur le site : Forum-btp.blogspot.com, consulté en septembre 2022 ;
- [2] BEGARIN Farid, Etude de parametres endogenes et exogenes au ciment portland ordinaire influençant l'hydratation de sa phase principale : le silicate tricalcique, thèse de doctorat, 2012.
- [3] BOUCHENAF A Othmane, Fabrication de clinker par un procédé de mecano-synthesein directe, Conférence: GC'2021, juin 2021.
- [4] BOUHIDEL Mouna épouse MEKAHLI, application d'analyse de cycle de vie pour un développement durable (cas des cimenteries algériennes), Mémoire de magister, Université el hadj lakhder batna, année 2009.
- [5] Technique de l'ingénieur base documentaire, construction et travaux publique, sur le site : <https://www.technique-ingénieur.fr>
- [6] DJERMANE ABDELLAH et DJEFFAL KAMAL, influence du refus et de l'ajout sur la résistance mécanique a jeune âge et à long terme du ciment (cas du CEM II/A-L-42.5N), Mémoire de Master, Université Oum El Bouaghi année 2020/2021.
- [7] HABOUL Salwa, étude de l'influence du gypse et de la pouzzolane sur les propriétés du ciment. Université de Bouira, Année 2018.
- [8] BOUAISSI Zahia, Effet de l'ajout de laitier de haut fourneau sur la rhéologie des bétons à l'état frais et a l'état durci, mémoire de Master, 2018.
- [9] N Belas Belaribi, M Semcha, and L Laoufi, Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons, Canadian Journal of Civil Engineering June 2003. <https://doi.org/10.1139/103-029>.
- [10] NF EN 197-1, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, avril 2012.
- [11] MOUMENE Sara et ATHAMNIA Ghania, ciment et cimenteries en Algérie : production et normalisation, mémoire de Master 2013.
- [12] TOUFIK Boubekour, évaluation des performances des ciments portland calcaire, mémoire de Magister, Université hassiba benbouali de chlef, Année 2009.
- [13] BOUREZG Abd Elkrim, conception et réalisation d'un appareil vicat, mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf de Msila, année 2016.
- [14] Lisa Hanle (USA), Pedro Maldonado (CHILI), Eiichi Onuma (JAPON), Milos Tichy (république tchèque) et Hendrik G.van Oss (USA). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, procédés industriels et utilisation des produits.