REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie civil

Elaboration des propriétés d'un mortier autoplaçant à matrice ciment-argile

---

Présenté par :

Belhadj Rekia

Khoukhi Fella

Proposé et Dirigé par

Dr : Boucherit .D

Promotion Juin 2019

REMERCIEMENTS

Tout d’abord, nous tenons à remercie ALLAH, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nos sincères remerciements et notre profonde gratitude s'adressent à notre promotrice, Madame **BOUCHERIT DALILA** pour ce thème précieux, pour sa patience, et surtout ses judicieux conseils.

Nous sommes frées aux membres de jury, d’avoir accepté d’examiner ce travail et de présider le jury de notre soutenance. Nous leur exprime nos profondes reconnaissances pour leur lecture critique et éclairante sur ce travail de fin d’étude.

Permettez-nous de vous exprimer notre admiration pour vos qualités humaines et professionnelles.

Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidées et soutenues.

Dédicace

Tout d'abord je tiens à remercier le dieu tout puissant qui m'adonné la force et la patience à achevé ce travail.



Je dédie ce travail



A mes parents :

vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Vos prières et vos bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserve et vous accorde santé, longue vie et bonheur.

A mes chers frères et sœur et toute ma famille

Je remercie mon ami et binôme **Fella** qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

À toute la promo de juin 2019 spécialement matériaux en génie civil et à tous les gens que je connais.

A tous ceux que je porte dans mon cœur.

REKIA

Dédicace

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

A ceux que j'aime jusqu'à la frontière de l'imagination :

Mon très cher père MOUSSA et ma très chère mère FATIMA

A ceux que j'adore et respecte :

Mes sœurs : HAYAT, MALIKA, AHLEM, AZHAR, RANIA et mes petits neveux adorés MARAME et ABDOU.

Mes tantes, mes oncles.

Mes cousins et Mes cousines.

Et toute ma famille

Je remercie mon ami et binôme ***REKIA*** *qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

A tous Mes Amis, A toute La promotion Génie Civil de l'année 2019.

A ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage.

FELLA

Sommaire

Résumé

Remerciement

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste d'abréviation

Introduction générale……..……1

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

PARTIE 1 : Généralités sur le ciment et les ajouts minéraux

Introduction 2

I.1.1 Histoire du ciment 2

I.1.2 Définition du ciment 3

I.1.3 Les déférents types du ciment Portland 3

I.3.1.1 Ciments courants ou ciments CEM.....3

I.1.3.2 Ciments spéciaux : 4

I.1.4 Fabrication du ciment 5

I.1.5 La composition du ciment Portland 7

I.1.5.1 Les constituants principaux.....7

I.5.2 Composition chimique 7

I.1.5.3 Composition minéralogique du ciment Portland 8

I.1.6 Hydratation du ciment.....9

I.1.6.1 Hydratation du ciment Portland 9

I.1.6.3Hydratation du ciment en présence d'additions pouzzolaniques……10

I.1.7Impacts environnementaux liés à la fabrication du ciment……...12

I.1.7.1 La source de CO2 dans l'industrie cimentière 12

I.1.7.2 Réduction des gaz à effets de serre dans l'industrie du ciment 12

I.1.7.3 Protection de l'environnement 13

I.1.7.4 Protection des eaux 13

I.1.7.5 La réhabilitation des carrières 13

I.1.7.6 Réduction de la consommation énergétique et l'émission de CO2 13

I .8 Les matériaux de remplacement de ciment……..……..... 14

I.1.8.1 Les ajouts minéraux inertes 14

I.1.8.1.1 Les fillers calcaires : 15

I.8.1.2 Les fibres :..... 15

I.1.8.2 Les ajouts minéraux actifs 15

I.1.8.2.1 Les pouzzolanes 15

I.1.8.2.2 La fumée de silice 16

I.1.8.2.3 Le laitier de haut fourneau 16

I.1.9 Les avantages des ajouts minéraux 17

I.1.10 L'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil 17

CONCLUSION

Partie 2 : Généralité sur les argiles

Introduction……...19

I.2.1 Définition d'argile ……..….19

I.2.2 Origine d'argile ……...20

I.2.3 Classification……....21

I.2.4 Principaux groupes d'argiles……....23

I.2.5 Principaux couleurs d'argiles……..24

I.2.6 Caractéristiques physico-chimiques……25

I.2.7 Composition chimique……..... 26

I.2.8 Extraction et traitement…….27
I.2.9 Les différentes formes galéniques…….28
I.2.10 Calcination ……..28
I.2.10.1 La calcination flash 29
I.2.10.2 La calcination traditionnelle 30
I.2.11 domaines d'études des argiles..... 30

PARTIE 3 : Généralités sur les mortiers

Introduction31

I.3.1 Définition des mortiers…… 31

I.3.2 Types de Mortier…….....31

A. Mortier du ciment…….31

B. Mortier de chaux hydrauliques……..31

C. Mortier bâtard…..…….....31

D. Mortier fabriqués sur chantier…...……....32

E. Mortier de hourdage de maçonnerie……..32

F. Mortier colle……...32

G. Mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi……...…….....32

H. Mortier industriel……..33

I. Mortier de résine……....33

J. Mortier de fibres……....33

I.3.3 Structure de MAP…….33

A. Un volume de pâte élevé ……34

B. Une quantité importante de fines …….34

C . Un fort dosage de superplastifiant……..34

D. Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal……..……..34

I.3.4 Méthodes de formulation……..….35

- Méthode d'Okamura…….....35

a- Choix du dosage en ciment……..35
b- Désignation du volume d'air ……35
b- Détermination du dosage du sable ……..35
d- Détermination du dosage minimal en eau ……36
I..3. 5 Caractérisation de MAP à l'état frais ……..36
I.3. 5.1 Fluidité et déformabilité de MAP……...37
I.3.5. 2 Essais de l'étalement au Mini cône de mortier…….38
I.3.5.3 Essais de déformabilité de l'Entonnoir en V (V-funnel)…….....39

I.3.6 Effet des argiles calcinées sur l'ouvrabilité des bétons/mortiers …… ..39

I.3.7 Effet des argiles calcinées sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers …….39

A. Résistance à la compression……...39

B. Résistance à la traction ……..40

I.3.8 Effet des argiles calcinées sur la durabilité des bétons/mortiers…….....41

A. Absorption d'eau……...41
B. Porosité …….41

CONCLUSION ……...42

CHAPITRE II : Matériaux et essais

Introduction……..43
II.1 Caractérisation des matériaux utilisent…….....43
II.1.1 Le Ciment……44
II.1.2 Le sable ……..45
II.1..2.1 Analyse granulométrique du sable utilisé……....46
II.1.2.2 Essais d'équivalent de sable……...46
II.1.3 Eau de gâchage ……...47

II.1.4. Adjuvant…….51

II.1.5 Les Ajout (Argile) ……..50

II.2.Formulation du MAP……50
II.3. Séquence de malaxage du MAP…….51

II.4. Essais sur MAP ……51

II.4.1-Etat frais……..51

a) Essais d'étalement au mini-cône……...52

b) Essai d'écoulement à entonnoir en V (V-funnel) ……..52

II.4.2 Etat durci……...54

a) Essais de compression……...54

b) Absorption d'eau par capillarité…….55

c) Porosité……56

d) Conductivité thermique……57

d) Resistance au feu …….58

e) Diffraction des rayons X (DRX) ……..59

II.5 VARIABLE ETUDIES…….61.

CONCLUSION ……62

CHAPITRE III : Résultats et interprétations

INTRODUCTION……..63

III.1. ÉTAT FRAIS……63

III.2 ÉTAT DURCI …….65

III.2.1. Résistance à la compression …….65

III.2.2. La résistance à la traction……..67

III.2.3. Perte en masse ……...68

III.2.4. Absorption d'eau par capillarité ……..70

III.2.5 La porosité……..73

III.2.6 La résistance au feu……75

III.2.7. La conductivité thermique …….76

Conclusion (interprétation de résultat) ……77

CONCLUSIONS GENERALE ……..78

ANNEX.

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

Tableau I-1 Les déférents types du ciment selon la norme EN 197-1.....5

Tableau I-2 Différentes phases du cimen……...9

Tableau I-3Classification des ajouts selon leur réactivité.....14

CHAPITRE II : Matériaux et essais

Tableau II . 1 : Analyse chimique du ciment et composition du clinker……....44

Tableau II . 2 : Propriétés physiques de sable utilisé……..…46

Liste des Figures

CHAPITRE I : Recherche bibliographique

Figure I-1 Différentes étapes de fabrication du ciment……..6
Figure I-2 Structure de la kaolinite……21
Figure I-3 Structure de l'illite……....22
Figure I-4 Structure du chlorite……22
Figure I-5 les différent type d'argiles……24
Figure I-6 représentation d' un four flash pour la production du mètakaolin……..29
Figure I-7constituants des mortiers……...31
Figure I-8 étalements au mini cone de mortier ……36
Figure I-9 essai de l'entonnoire en V [v.feunnel……37

CHAPITRE II : Matériaux et essais

Fig II. 1 : sable Oued-Souf……45
Fig- II.2 : Courbe granulométrique de sable……....47
Fig II. 3 Superplastifiant MEDAFLOW 145……47
Fig II.4 : Argile beige avant la calcination……...48
Fig II.5 : Argile verte avant la calcination……..48
Fig II.6 : Le Four de calcination ……48
Fig II.7 : les étape de préparation……49
Fig- II. 8 : Séquence de malaxage autoplaçant…… …….51
Fig- II.9: protocole de malaxage…… ……..52
Fig- II.10 : Mesure l'etalement de mortier autoplacent…… ……..53
Fig- II. 11 protocole de l'essai d'entonnoir (V- funnel)…… .. ……..53
Fig- II. 12: Fabrication des éprouvettes……54
Fig- II-13 : Dispositif de mesure de la résistance à la compression……..55
Fig.II.14 : Principe d'essai d'absorption d'eau par capillarité……..55
Fig II.15 : Essai d'absorption d'eau par succion capillaire de MAP……....56
Fig -II.16: Mesure de la porosité accessible à l'eau……..…...57
Fig - II.17 : Le CT METRE…….....58
Fig-II-18: Essai résistance au fau de MAP…….....59
Fig-II-19: Diffractomètre de Rayons X modèle Phillips Xpert-pro……..…...60
Fig II .20 : spectre de diffraction de rayon X de deux argile ; a – rouge, b- beige……....61

CHAPITRE III : Résultats et interprétation

Fig III . 1 : Temps d'écoulement de différents MAP…….64
Fig III. 2 : Temps d'écoulement de différents MAP…….64
Fig III . 3 : Développement des Résistances à la compression des MAPAB en fonction du taux de substitutions en argile Beige ……66
Fig III.4 : Développement des Résistances à la compression des MAPAR en fonction du taux de substitutions en argile rouge ……66
Fig III.5 : Développement des Résistances à la traction par flexion des MAPAB en fonction du taux de substitutions en argile Beige……. 67
Fig III.6 : Développement des Résistances à la traction par flexion des MAPAR en fonction du taux de substitutions en argile rouge……..68
Fig III.7 : Variations de la perte en masse de MAPAR dans le temps (jours)…….69
Fig III.8 : Variation de la perte en masse de MAPAB dans le temps (jours)…….69
Fig III.9 : Absorption capillaire des MARAR…….70
Fig III.10: Absorption capillaire des MAPAB…….71
Fig III.11 : Coefficient d'absorption capillaire des MAPAR à l' âge 28 J……..71
Fig III.12 : Absorption capillaire des MAPAR à l'âge 56 j……72
Fig III.13 : Absorption capillaire des MAPAR à l' Age 56 j…….72
Fig III.14 : Coefficient d'absorption capillaire des MAP à l'âge56 jours……...73
Fig III.15 : la porosité des MAPA à l' âgé 28 Jour…….74
Fig III.16: la porosité des MAPA a l' âge de 56 jour……...74
Fig III.17: Resistance au feu des MAPAB……75
Fig III.18: Resistance au feu des MAPAR…….76
Fig III.19: Conductivité thermique des MAPA……76

Références bibliographiques

[l] FEBELCEM, Histoire de ciment, URL:http: // www.febelcem.be. En ligne le 6 Mai 2018.

[2) NF 197-l, « ciment, spécification et critère de conformité des ciments)),2001.

[3) Bouzidi.M.A, «caractérisation des valorisations issus de la chainemine-usine sidérurgique en vue de la production de ciment cas de la mine de boukhadra et du complexe sidérurgique d'elhadjar Algérie>>,Thèse de doctorat, université de Bejaia,2015.

(4) Dang. T, « valorisation des sédiments marins bétons comme matériaux de construction », Thèse de doctorat, université de Rennes, 2011.

[5] Saidat. F, « Activation chimique de métakaolin dans une matrice cimentaire >), thèse de doctorat, université de Toulouse Ill Paul-Sabatier,2013.

[6] Centre d'information sur le ciment et des applications, guide de prescription des ciments pour des constructions durables, Octobre2009.

(7) SAVADOCO.N, « Elaboration d'un éco-ciment à base de poudre de mâchefer de charbon)), thèse de doctorat, université de Bretagne Loire, 2017.

[8] BENRAHLA.A, Mémoire de Master, ENTP,2017.

[9] Jacobs. J, la contribution de l'industrie cimentière à *la* réduction des émissions de CO2, fédération belge du ciment, FEBELCEM,2007.

[10] Norme AS1M standard, (618-08: standars spéfication for coal fly Ash an Raw or calcined naturel pozzolan for use inconcret, west conshohachem, PA :Anual book of ASTM standards , ASTM international ,2008.

[11] Febelcem, « «Contribution de l'industrie du ciment à la réduction des émissions de C02»,2007.

[12] Syndicat français de l'industrie du ciment, « L'industrie cimentière, Exemple à suivre », Economie circulaire et COP21, Novembre2015.

[13] Febelcem, rapport environnementale de l 'industrie du cimentière Belge, fédération Belge du ciment, FEBELCEM,2006.

Références Bibliographiques

[14] Ahmidi. S, « Modélisation de l'efficacité des additions minérales entre les propriétés mécanique et de durabilité par le concept du liant équivalent », diplôme de magistère, université de Chief, 2012.

[16]allègre**,** Jade, les silicates d'alumine (argiles) en thérapeutique, thèse de doctorat en médicine, université du pari XIII, 2012.

[17]Valencia.F, Caractérisations des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène. Rapport GCT-2008-0, Département de génie civil faculté des sciences et de génie, Université Laval (Canada), 2008.

[18]Adrianne.P, L'argile, médecine ancestrale de la tradition aux preuves scientifiques, éditions Amyris SPRL, dépôt légal : 4e trimestre 2003, ISBN : 2 930353-15-5.

[19]Hattat Mohamed, contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique, Etude sur le site : unité Maghreb céramique de Touggourt, Mémoire de Magistère, université Kasdi Merbah Ouargla.

[20]Merabet.D, Belkacemi.H, Caractérisation minéralogique et chimique du kaolin de Tamazert (Algérie), Annales de Chimie Science des Matériaux (Vol. 28, No. 5, pp. 61-83). No longer published by Elsevier, 2003.

[21]Moore.M.D, Reynolds.C.R: X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Vol. 378. Oxford: Oxford university press, 1989.

[22]Segad.M, Jonsson.B, Åkesson.T, Cabane.B: Ca/Na montmorillonite: structure, forces and swelling properties, Langmuir 26.8, 2010, pages 5782-5790.

[23]Darcel.L.C: A" liver" antigen associated with avian erythroblastosis: binding by bentonite and precipitation with sodium dodecyl sulphate. Canadian Journal of Comparative Medicine, *46*(1), 1982, page 97.

[24]Hower.J, Mowatt.C.T, The mineralogy of illites and mixed-layer illite/montmorillonites. American Mineralogist, vol. 51, no 5-6, 1900.

[25]MValášková.M, Martynkova.S.G, Vermiculite: structural properties and examples of the use. Clay minerals in nature-their characterization, modification and application, *InTech*, pages 209-238., 2012.

[26]Orcel.J, Caillère.S, Hénin.S, Nouvel essai de classification des chlorites, Mineral. Mag ,1950 .²

[27]Qabaqous.O, Tijani.N., Bennani.N.M, El Krouk .A : Elaboration et caractérisation des supports plans à base d'argile (Rhassoul) pour membranes minérales (Préparation and

Characterization of supports plans from the (Rhassoul) Clay for minéral membranes), Mater. Environ. Sci. 5 (S1), 2244-2249, ISSN : 2028-2508, CODEN: JMESCN, MPE14, 2014.

[29]Villieras .F. Argiles : histoire d'avenir, éditions Recréateurs, dépôt légal, page 16,2008.

[30] L.J. Poppe, V.F. Paskevich, J.C. Hathaway, and D.S. Blackwood. A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction. U. S. Geological Survey Open-File Report 01-041.http://www.usgs.gov.

[31] : Groupe des ingénieurs, ≪ Mortiers et bétons hydraulique, matériaux de construction ≫, Edition Eyrolles, Paris, 1997.

[32] AbdelHamid R'MILI : Étude de formulation et de comportement des Bétons Auto-Plaçants : Incorporation du sable de concassage et du sable du désert 13 janvier 2010

[33]BOUALI .K : Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires mémoire de magister,Université M'hmed Bougara, Boumerdes, 2014

[34]HOLCIM 2004 : Le béton autocompactant. Recommandation étudiée par la société Holcim.

Suisse. 26 Novembre 2004.

[35]BOUALI .K: Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires mémoire de magister,Université M'hmed Bougara, Boumerdes, 2014

[36]Mr. GUELLIL Mustapha Khadir : FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS PAR LA METHODE DE LA PATE EN EXCES et soutenu le 2012

[37]ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL AFGC 2008 : Groupe de Travail - Recommandations pour l'emploi es bétons autoplaçants. Documents scientifiques et techniques. 2ème Édition. Janvier 2008.

[38]M. YURUGI, N. SAKATA, M. IWAI & G. SAKAI 1993 : Mix proportion for highly workable concrete. Conference Concrete 2000. Dundee. 7-9 September 1993.

[40] R. Siddique, A. Kaur, Effect of metakaolin on the near surface characteristics of concrete, Materials and structures 44(1) (2011) 77-88.

[41] J. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, Construction and Building Materials 22(9) (2008) 1963-1971.

[42] Z. Li, Z. Ding, Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, Cement and Concrete Research 33(4) (2003) 579-584.

[43] K. Behfarnia, O. Farshadfar, The effects of pozzolanic binders and polypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack, Construction and Building Materials 38 (2013) 64-71.

[44] E. Badogiannis, S. Tsivilis, Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete, Cement and Concrete Composites 31(2) (2009) 128-133.

[45] S.A. Memon, R. Arsalan, S. Khan, T.Y. Lo, Utilization of Pakistani bentonite as partial replacement of cement in concrete, Construction and Building Materials 30 (2012) 237-242.

[46] K. Gruber, T. Ramlochan, A. Boddy, R. Hooton, M. Thomas, Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, Cement and concrete composites 23(6) (2001) 479-484.

[47] M. Sonebi, M. Lachemi, K. Hossain, Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture, Construction and Building Materials 38 (2013) 126-138.

[48] E. Moulin, P. Blanc, D. Sorrentino, Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements, Cement and Concrete Composites 23(6) (2001) 463-469.

[49] G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsivilis, E. Badogiannis, The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, Cement and Concrete Composites 27(1) (2005) 125-130.

[50] J. Bai, S. Wild, A. Gailius, Accelerating early strength development of concrete using metakaolin as an admixture, Mater Sci 10(4) (2004) 338-344.

[51] P. Dinakar, P.K. Sahoo, G. Sriram, Effect of metakaolin content on the properties of high strength concrete, International Journal of Concrete Structures and Materials 7(3) (2013) 215.

[52] J. Khatib, Low temperature curing of metakaolin concrete, Journal of Materials in Civil Engineering 21(8) (2009) 362-367.

[53] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani, Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, Construction and Building Materials 41 (2013) 879-888.

[54] J. Ambroise, M. Murat, J. Pera, Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals V. Extension of the research and general conclusions, Cement and Concrete Research 15(2) (1985) 261-268.

[55] H.-S. Kim, S.-H. Lee, H.-Y. Moon, Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin, Construction and building materials 21(6) (2007) 1229-1237.

[56] A. Yerramala, C. Ramachandurdu, V.B. Desai, Flexural strength of metakaolin ferrocement, Composites Part B: Engineering 55 (2013) 176-183.

[57] D. Vu, P. Stroeven, V. Bui, Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete, Cement and Concrete Composites 23(6) (2001) 471-478.

[58] M.J. Naik, S. Gupta, Experimental Investigation on the Properties of Concrete Replacing Cement and Natural Sand with Metakaolin and Robo-Sand, NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY KURUKSHETRA, 2016.

[59] K. Al-Jabri, H. Shoukry, Influence of nano metakaolin on thermo-physical, mechanical and microstructural properties of high-volume ferrochrome slag mortar, Construction and Building Materials 177 (2018) 210-221.

[60] L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, Durability of mortars modified with metakaolin, Cement and Concrete Research 33(9) (2003) 1473-1479.

[61] S. Barbhuiya, P. Chow, S. Memon, Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin, Construction and Building Materials 95 (2015) 696-702.

[62] Ihadjadene Virginie, l'argile à l'hôpital- utilisation de l'argile dans un service de soins hospitalier, Formation Hippocratus Phyto aromathérapie Infirmière D.E, 2012.

[63]NF P 15-476, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments- Détermination de la finesse », Aout 1990.

[64] NF EN 1008, « Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR. 2003.

[65] SABLOCRETE, « Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (1994). Paris, France.

[66] NF EN 12350-8 a présente norme européenne spécifie Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant Essai d'étalement au cône d'Abrams

[67] NF EN 12350-9 a présente norme européenne spécifie la méthode de détermination de la durée d'écoulement à l'entonnoir en v pour le béton autoplaçant.

[68] Paris pp109-120. NF EN 12390-2, 2001, « Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR.RILEM Proceedins PRO 7

[69] NF P 18-412, «caractéristiques particulière des machines hydrauliques pour essais de compression. 1981.

[70] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.

[71] ISO 8497, 1994 Isolation thermique : Détermination des propriétés relatives au transfert chaleur en régime stationnaire dans les isolants thermiques pour conduites

[72] NF EN 993-15 .Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle) Octobre2005.

[73] Zater M., Synthèse, Caractérisation et Etude Structurale par Diffraction des RX des Oxalates mixtes à base de cuivre, de titane et de plomb, Thèse de magister en chimie Université Mentouri de Constantine (2007).

[74]NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques - Avril 2006.

[75] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage »,
AFNOR.

[76]NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR

[77]NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.

[78]NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

Résumé

Le processus de fabrication du ciment constitue l'une des sources d'émission de CO2 les plus importantes au monde avec des émissions s'élevant à 1T/T ciment. Afin de minimiser le taux d'émissions issues de la production de ciment, il convient donc de s'intéresser plus particulièrement à la production du clinker lui-même. Pour cette raison, l'une des solutions proposées consiste à faire substituer une partie de clinker par un matériau, qui peut être inerte, comme le calcaire, ou actif comme le laitier, la fumée de silice et les pouzzolanes.

On propose dans ce travail d'utiliser une argile abondante dans la région de Mdédéa afin d'élaborer une nouvelle pouzzolane artificielle.

A travers une compagne expérimentale appropriée, nous avons pu déduire que le pourcentage de substitution qui assure l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques du mortier autoplaçant est de 10%. Ce dernier a subi un protocole expérimental qui a abouti à des résultats encourageants.

Mots clés : Argile, propriétés physiques et mécaniques, Ciment, calcination.

Abstract

The cementmanufacturingprocessis one of the most important sources of CO2 emissions in the world withemissionsamounting to 1 T/ T of cement. To minimize the rate of emissionsfromcement production, soitisworthconsideringespecially the production of clinker itself. For thisreason, one of the proposed solutions is to substitute

a part of clinker by an addition whichcanbeinert, such as limestone, or active as slag, silica fume, and pozzolans.

We propose in thiswork to use abundantclay in the region of Médéa, as an addition to clinker to develop a new artificialpozzolan one hand,

Through an appropriate experimental companion, we have been able to deduce that the percentage of substitution which improves the physical and mechanical characteristics of the self-compacting mortar is 10%. This latter has undergone an experimental protocol, which gives an encouraging results..

Key Words: Clay, phisical a,d mecanical properties, Cement, .

ملخص

تعتبر عملية تصنيع الأسمنت واحدة من أكبر مصادر انبعاث ثاني أكسيد الكربون في العالم مع انبعاث 1 .T / T.الأسمنت من أجل تقليل معدل الانبعاث الناتجة عن إنتاج الأسمنت ، من الضروري التركيز بشكل خاص على إنتاج الكلنكر نفسه. لهذا السبب ، يتمثل أحد الحلول المقترحة في استبدال جزء من الكلنكر بمادة يمكن أن تكون خاملة ، مثل الحجر الجيري أو نشطة مثل الخبث ، ودخان السيليكا والبوزولان.

يُقترح في هذا العمل استخدام طين وفير في منطقة المدية من أجل تطوير بوزولان اصطناعي جديد.

من خلال سلسلة تجارب مناسبة ، تمكنا من استنتاج أن نسبة الطين المستبدلة في الاسمنت التي عملت على تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للملاط المتموضع ذاتيا كانت 10 ٪. وقد خضع هذا الأخير لبروتوكول تجريبي أدى إلى نتائج مشجعة.

الكلمات المفتاحية: الطين ، الخ ، الاسمنت ،الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية .الحرق .

Introduction générale

Dans le monde, la production et la consommation de béton sont en forte augmentation. Bien que la disponibilité des agrégats ne constitue pas le souci majeur des constructeurs, la crise de ciment n'a pas cessé de l'être. Le pays a connu plusieurs crises de ciment, son prix a connu une hausse de 100%, dont la cause a été tout simplement l'insuffisance de production. En Algérie, les ajouts actifs utilisés présentent un souci pour les fabricants. Une seule ressource pour le laitier (Hadjar), de même pour la pouzzolane (Beni saf), pas de MK ni fumée de silice ni cendres volantes. Pour ceci, les usines utilisent souvent des ajouts inertes tels que le calcaire et le tuf. Notre travail porte sur l'élaboration d'un nouveau matériau qui peut servir comme ajout dans la fabrication du ciment ou comme addition au ciment dans la confection des bétons. L'utilisation de cette addition peut participer à la réduction des quantités de CO2 émises lors de la fabrication du clinker, comme elle peut réduire la consommation de ciment de10 à 15%.

Le présent travail vise d'une part à fabriquer un matériau économique par la substitution du ciment par la poudre de l'argile, et d'autre part d'étudier le potentiel pouzzolanique de deux argiles, abondante et peu exploitée, dans la région de Médéa. La composition minéralogique du matériau semblait favorable, du fait qu'il contenait beaucoup de silice (90%). Donc la pouzzolanicité de ces argiles est importante.

Pour ce faire, Cette étude sera présentée sous trois titres ; analyse bibliographique, essais et matériaux et interprétation des résultats.

Le premier chapitre est composé deux parties ; dont la première aborde une brève description du ciment, dans laquelle, la composition, le processus de fabrication et les mécanismes d'hydratation ont été exposés. Ajoutant une vue sur les différents ajouts minéraux utilisés dans la fabrication des matériaux cimentaire. La deuxième partie s'articule sur la structure, classification, type et les caractéristiques physico-chimiques des argiles.

Dans le deuxième chapitre nous exposons en détail les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que les différentes étapes de l'étude expérimentale réalisée sur deux séries de MAP dont la substitution du ciment a été par deux types d'argiles.

Les résultats obtenus ont été exposés, interprétés et analysés dans le troisième chapitre.

A la fin, nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons le but de cette étude, les principaux résultats obtenus.

PARTIE 1 : Généralités sur le ciment et les ajouts minéraux

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons le contexte général de l'industrie du ciment, ainsi que les différents défis que cette industrie doit relever pour assurer sa continuité dans le temps.

Nous passons en revue l'état de connaissance générale sur les additions minérales pouzzolaniques et leur utilisation dans le ciment. Il sera question de faire le point sur la fabrication du clinker, le processus de l'hydratation de ses principaux constituants. En suite, nous regarderons l'impact environnemental de la fabrication du ciment.

Enfin, nous nous intéresserons aux matériaux de remplacement du ciment (les ajouts minéraux). Cette partie se base sur les études récentes sur le ciment ainsi que sur la normalisation actuelle sur l'utilisation des ajouts cimentaires.

I.1.1. Histoire du ciment

Le mot ciment vient du latin « cémenteur », qui signifie mortier, liant des maçonneries, il est utilisé depuis des millénaires, en Egypte antique ; c'est un mortier de plâtre qui liait les pierres. Les Grecs sont les premiers constructeurs à employer la chaux obtenue par cuisson du calcaire, les Romains améliorent ce liant en y ajoutant des cendres volcaniques et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Ce liant rend possible la construction de grands ouvrages tels les arènes, l'amphithéâtre ou les aqueducs, dont certains sont encore parfaitement conservé vingt siècles plus tard.

C'est au XIX^{ème} siècle que sont produites les premières chaux hydrauliques proches des ciments modernes, principalement du fait des progrès réalisés dans les procédés de cuisson. En 1759, L'Anglais John Smeaton produit un mortier aussi dur que de la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques.

Le Français Louis Vicat découvre en 1817 les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication de ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne, mais il publie ses travaux sans prendre de brevets.

C'est l'Anglais Joseph Aspdin qui fait breveter en 1824 le ciment « portland», obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson du calcaire et d'argile dans des fours

alimentés au charbon. La dénomination « Portland» est due simplement à la similarité de couleur et de dureté avec la pierre de portland (Sud de l'Angleterre), à l'heure actuelle toujours employée dans l'industrie **[1].**

I.1. 2 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue, qui gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcie suite au processus d'hydratation. Après durcissement le ciment, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le clinker est le principal constituant du ciment, le clinker se compose principalement de silicate et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3) [2], afin de réguler la prise du ciment ; des régulateurs de prise sont ajoutés au clinker, d'autres ajouts peuvent être aussi associés au clinker avec différents effets sur le ciment obtenu, ces ajouts peuvent représenter jusqu'à 35%.

I.1. 3 Les différents types du ciment Portland

I.1. 3.1 Ciments courants ou ciments CEM

- **Ciment Portland artificiel (CPA-CEM I)** : Il contient minimum 95% de clinker.
  Complément : gypse de 0 à 5%.
  Utilisation : travaux du béton armé ou précontraint, ils permettent une mise en service et un décoffrage rapide.
- **Ciment Portland composés (CPJ-CEM II)** : Ils sont constitués au moins de 65% de clinker.
  Complément : Les laitiers de haut fourneaux, cendres volantes, pouzzolane, fumée de silice, dont le total ne dépasse pas les 35%.
  Utilisation : béton ouvrage courants, travaux de maçonnerie, travaux exigeants une élévation de température modérée.
- **Ciment de hauts fourneaux (CHF - CEM III) :** Trois types de ciment comportent des pourcentages de laitier assez important, il s'agit de ciment de haut fourneau CEM III/A, B ou C.

· CEM III A : contient 35 à 64 % de clinker.

- CEM III B : contient 20 à 34 % de clinker.
- CEM III C : contient 5 à 19 % de clinker.

Complément **:**

- ❖ CEM III A : 36 à 65% de laitier de haut fourneau.
- ❖ CEM III B : 66 à 80% de laitier de haut fourneau.
- ❖ CEM III C : 81 à 95% de laitier de haut fourneau.

Utilisation : travaux souterrains, ouvrage poreaux usées ou industrielles, travaux a la mer.

- ➢ **Ciment pouzzolaniques (CP-CEM IV)** : Deux types de ciments

- CEM IV/A : contient 65 à 89% de clinker.
- CEM IV /B : contient 45 à 64 % de clinker.

Complément : laitier de haut fourneau, cendres volantes, calcaire, pouzzolane naturelle, etc. Elle se trouve de 11 à 55%.

Utilisation : Idem CEM III.

- ➢ **Ciment aux laitiers et aux cendres (CLC-CEM V)** : Il y a deux types de ciments

- CEM V/A : de 40 à 64 % du clinker.
- CEM V/B : de 20 à 38 % du clinker.

Complément : pour le CEM V/A ; de 18 à 30 % de laitier ou de 16 à 30 % de cendre volante et/ou de pouzzolane.

Pour le CEM V B ; de 31 à 50 % de laitier, ou cendre volante et/ou de pouzzolane.

Utilisation : Idem CEM III.

- ➢ **Ciment de laitier au clinker (CLK-CEM VI)** : Ils sont constitués de 17 % de clinker.

Complément : ils contiennent au moins 80% de laitier et 3% de filler.

Utilisation : idem CEM III.

I.1. 3.2 Ciments spéciaux

- ➢ **Ciment blanc** : le ciment blanc possède les même propriétés mécaniques que le ciment gris .Ils se conserve blanc, ou d'y ajouter des adjuvants pour le colorer.

Utilisation : usage décoratif, effet esthétique, mortiers apparents, chapes de béton décoratives, jointement des carrelages, appuis de fenêtre etc.

- **Ciment maçonné** : ciment synthétisé d'un mélange de ciment portland, de gypse, calcaire et adjuvant divers.

  Utilisation : confection des chapes, des mortiers, et enduit.

- **Ciment prompt** : ciment à base de calcaire argileux.

Utilisation : scellements, travaux de réparation, enduit de façade.

- **Ciment fondu** : Fusion de calcaire et de bauxite.

  Utilisation : ouvrage à résistance élevé à court terme, sols résistants au choc, fours, cheminée.

Tableau I-1 : Les différents types du ciment selon la norme EN 197-1 **[2]**

Types de ciments courants	Notation	Clinker (K) (%)	Autres constituants (S, D, P, Q, V, W, T, L et LL	Constituants secondaire (%)
Ciment Portland	CEM I	95 – 100	-	0-5
Ciment Portland composé	CEM II/A CEM II/B	80-94 65-79	6-20 21-35	0-5 0-5
Ciment de haut fourneau	CEM III/A CEM III/B CEM III/C	35 – 64 20 – 34 5 – 19	36 – 65 66 – 80 81 – 95	0 – 5 0 – 5 0 – 5
Ciment pouzzolanique	CEM IV/A CEM IV/B	65 – 89 45 – 64	11 – 35 36 – 55	0 – 5 0 – 5
Ciment composé	CEM V/A CEM V/B	40 – 64 20 – 38	36 – 60 62 – 80	0 – 5 0 – 5

I.1. 4 Fabrication du ciment

La fabrication du ciment est un processus industriel, passant par une multitude d'étapes, dans l'essentiel est résumé dans ce qui suit :

- L'extraction de la matière première en carrière.
- Le pré homogénéisation et transport.
- Le broyage de Cru
- La cuisson.
- Le broyage de clinker.
- Le stockage.

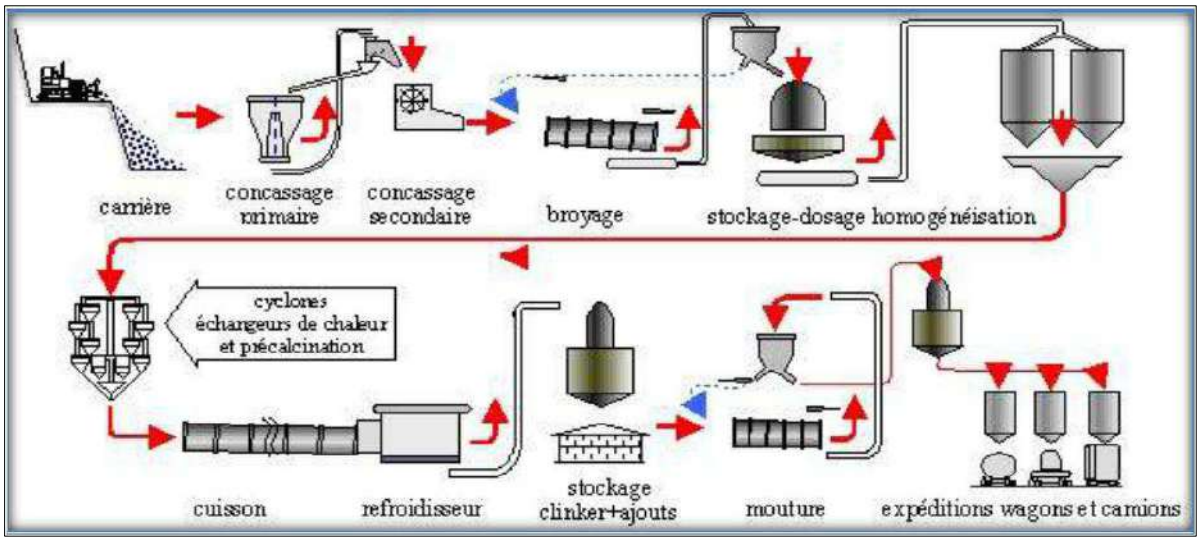


Fig I-1 : Différentes étapes de fabrication du ciment **[3]**

On distingue plusieurs voies de fabrication du ciment :

Fabrication par voie sèche (la plus utilisée de nos jours).

Fabrication par voie humide (la plus ancienne des méthodes).

Fabrication par voie semi-sèche (en partant de la voie humide).

Fabrication par voie semi-humide (en partant de la voie humide).

Dans la fabrication du ciment par voie sèche, la chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires (80%), l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont apportés par des argiles (20%) extraits des carrières **[4]** qui sont concassés, homogénéisés, puis apporté a haute température (1450°C) dans un four. Le produit synthèse après refroidissement rapide de (1450 à 100 °C) en quelques minutes est le clinker (trempe) **[5].** Le mélange de calcaire et d'argile est chauffé .Au début, il ya le départ de l'eau de mouillage, composition du calcaire qui est le carbonate de calcium ($CaCO_3$), en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO), A (1450 °C 1550 °C), température de fusion, le liquide obtenu permet l'obtention des différentes réactions. Ainsi les composantes du ciment sont formées de la façon suivante :

Une qualité de CaO est retenue par AL_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide la silice SiO_2 et la chaux CaO restantes réagissent pour donner le silicate bicalcique (C_2S) dont une quantité se transforme en C_3S silicate tricalcique, qui constitue le clinker.

I.1. 5 La composition du ciment Portland

I.1. 5.1 Les constituants principaux

 Le clinker : le clinker portland entre dans la composition de tous les ciments courants il résulte de la réaction à haut température (1450 °C) de roches calcaires et des argiles. Contenant des propriétés visées des quatre oxydes principaux suivant : Le calcium (CaO), le silicium (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de fer (Fe_2O_3) **[6].**

- **Le laitier de haut fourneau** : c'est un coproduit de la fabrication de la fonte, provenant de la fusion du mènerai de fer dans un haut fourneau, il se compose essentiellement, d'oxyde de fer, la silice et l'alumine.
- **Les pouzzolanes** : Ils se composent de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique, ils peuvent être naturels, provenant de projection volcaniques ou bien artificiels obtenue par cuisson de matière ayant des compositions chimique adéquates.
- **Les cendres** : les cendres pulvérulentes ont des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques issues de la combustion en centrales thermique de certaines combustibles minéraux solides.
- **Les fillers** : Ils sont utilisés dans le ciment pour leurs propriétés physiques qui grâce à leurs granularité confèrent quelques qualités aux ciments (maniabilité, diminution de perméabilité, etc).
- **Les additions** : Ce sont des produits qui s'ajoutent en petites quantités aux constituants dans les limites définis pour chaque type de ciment.
- **Le gypse** : c'est une roche de sulfate de calcium hydraté (CaSO4), très abondante à l'état naturel, qui se déshydrate à une température environnante les 100 0C. Il est ajouté au clinker lors du broyage son rôle est d'éviter la prise trop rapide.
- **Les sels solubles** : ils n'ont pas une action sur le ciment, ils sont utilisés pour faciliter le broyage du ciment et éviter l'agglomération des grains.

I.1. 5.2 Composition chimique

- **Oxyde de calcium ou la chaux (CaO)** : Il provient de la décarbonatation du carbonate de calcium ($CaCO_3$) et de la combinaison du calcium avec l'oxygène.

La forte teneur en chaux entraine un durcissement rapide, une prise lente, et une forte résistance du ciment, sinon la chaux donne des ciments à prise rapide difficilement corrigeable au gypse, elle s'exprime en quantités moyennes dans les ciments de 62 a 80%.

- **Oxyde de silicium (SiO_2)** : C'est l'un des minéraux le plus abondant dans la nature très stable a température ambiante, il a une forte réaction avec les bases quand il est chauffé pour former des silicates. Les ciments à haute teneur en silice sont de prise lente et offrent de grande résistance à la traction, mais nécessitent une température de cuisson élevée. Les ciments contiennent de 21 à 24% de SiO2.
- **Oxyde d'aluminium (Al_2O_3) :** Il se comporte comme un acide dans certains cas et en d'autre comme une base, dans le ciment lorsqu'il est combiné devient un important composant. Oxyde d'aluminium se trouve en quantité faible de 4 à 8% dans le ciment, quand la teneur augmente la prise est plus rapide. C'est pour cela que les ciments contiennent plus de silice.
- **Hydroxyde calcique ($Ca(OH)_2$)** : Il résulte de l'hydratation de la chaux, lors d'un broyage du ciment par l'action de l'eau injecté en faible quantité dans l'addition de gypse.
- **Oxyde magnétique (MgO)** : Il provient de la chaux et des argiles qui peuvent contenir des carbonates magnétiques, sa présence ne doit pas dépassé 5% en raison de son caractère destructif pour le béton durci.
- **Oxyde ferrique (Fe_2O_3)** : Il provient des schistes ou des argiles, il se trouve en quantité relativement faible de 2 à 5% dans le ciment, ses caractéristiques sont semblables à celle d'alumine.

I.1. 5.3 Composition minéralogique du ciment Portland

Quatre composés minéralogiques principaux, également appelé « phase » représentent 90% ou plus, de la masse du clinker **[5]** et sont énumérés dans le **Tableau I-2**. En effet, cette notation abrégée, est utilisée par les chimistes de l'industrie du ciment décrit chaque oxyde par une lettre : CaO= C, S_iO_2=S, Al_2O_3=A et Fe_2O_3= F, H_2O est désigné par H et SO_3 par $\bar{}$S.

Tableau I-2 Différentes phases du ciment **[5]**

Nom	Formule	Abréviation	Proportion massique %
Alite (silicate tricalcique)	$3CaO_2 + SiO_2$	C_3S	45-65
Bilite (silicate bi calcique)	$2CaO_2 + SiO_2$	C_2S	15-25
Aluminate tricalcique	$3CaO_2 + Al_2O_3$	C_3A	0-10
Aluminoferrite tétracalcique	$4CaO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	C_4AF	0-15

I.1. 6 Hydratation du ciment

I.1. 6.1 Hydratation du ciment Portland

L'hydratation du ciment commence, lorsque le ciment anhydre est en contact avec l'eau, elle s'accompagne d'un dégagement de chaleur, qui provient de la réaction des phases principales du ciment, essentiellement le **C_3A**. L'hydratation du ciment se fait dans une synergie entre les différentes réactions des phases cimentaires.

En résumé, dés le contact du ciment avec l'eau on observe une dissolution des différentes espèces, les **C-S-H** et l'étrangéité se forment et la vitesse d'hydratation diminue **[7]**

Le processus d'hydratation s'articule autour de cinq phases suivantes :

- **Phase I (période de gâchage)** : correspond au mouillage des grains du ciment et leur dissolution, elle est très rapide de 0 à 15 minutes et exothermique. le C_3S et le C_3A réagissent immédiatement avec l'eau et forment de l'étrangéité et des C-S-H
- **Phase II (période dormante)** : sa durée est de quelques heures , le dégagement de chaleur est faible, durant cette période aucune évolution de la pâte ne semble se produire, mais les réactions chimiques ont commencé, le PH de la solution augmente (des ions passent en solution dans l'eau), des ions de calcium, silicates, hydroxydes et sulfates, par conséquent , la formation des C-S-H et d'étrangéité se poursuit lentement et la phase aqueuse devient sur saturée en chaux .
- **Phase III (période de prise ou accélération)** : Cette phase dure de 4 à 8 heures, la portlandite se précipite les **C-S-H** se forment rapidement, cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur et la pâte devient de plus en plus solide. La fin de la prise est caractérisée par une accélération de l'hydratation.

- **Phase IV (période de durcissement) :** elle dure de 8 à 24 heures la couche d'hydratation qui enrobe les grains de ciment est suffisamment épaisse pour ralentir la diffusion des ions, pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffusé à travers les pores le gel de C-S-H, la chaleur dégagée diminue, le gypse est épuisé, et le **C_3A** résiduel réagit avec l'étrangéité pour former du mono-sulfato-aluminate de calcium. Les résistances mécaniques se développent et la porosité se remplit progressivement des **C-S-H**.
- **Phase V (période de ralentissement)** : les réactions d'hydratation, sont limitées à cause de la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle des grains de ciment, elles deviennent de plus en plus lentes.

I.1.6.2 -Hydratation des composants du ciment portland

- Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C_3S) et les silicates bicalciques (C_2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca^{2+}, OH^- et $H_2\ SiO_4^{\ 2}$. qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($Ca(OH)_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C_2S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible **[5]**.

A titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

Pour le C_3S: $2C3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$.

Pour le C_2S: 2C2S $+ 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$.

- Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme du gypse au clinker pour contrôler ces réactions **[5].**

- Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

La réaction est donnée par:

$C_3A + 3(CaSO_4\ 2H_2O) + 32H \rightarrow C_3A\ 3(CaSO_4.\ 2H_2O)\ H_{32}$

- Hydratation de L'aluminoferrite tétra calcique C_4AF

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente.

I.1. 6.3 Hydratation du ciment en présence d'additions pouzzolaniques

Les pouzzolanes sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas de propriétés liantes, mais capables de réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium en présence d'humidité et de température ambiante pour donner naissance à des composés possédant des propriétés liantes **[9].**

D'après la norme ASTM C618 [10] un matériau a des caractéristiques pouzzolaniques si :

- Sa composition chimique vérifie : $\mathbf{Al_2O_3 + Si O_2 + Fe_2O_3 > 70\%.}$
- Son indice d'activité pour un taux de substitution de 25% à 28 jours est supérieur à 67%.
- Sa teneur en verre donnée par la différence entre la teneur en silice et en chaux, est supérieure à 34%.

Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, la fumée de silice et le métakaolin constituent des ajouts pouzzolaniques actifs.

Ils réagissent avec la portlandite produite par l'hydratation du clinker pour donner des composés hydratés semblables à ceux du ciment. Les réactions pouzzolaniques dépendent de la température, de la finesse des grains, et de la composition chimique des additifs pouzzolanique ainsi que leurs pourcentages. Ces derniers sont riches en silice et pauvres en calcium. Ainsi une solution riche en calcium et à PH élevé provoque la dissolution de la silice

$$Si O_2 + 2\ OH^- \longrightarrow H_2\ Si\ O_4^{2-}$$

Le calcium dans la solution à milieu basique conduit à la précipitation de C-S-H :

$$n Ca2+ + H2\ SiO_4^{2-} + 2(n-1)OH^- + m\ H_2O \longrightarrow CSH\ ou\ (n\ CaO\ ,\ Si O_2\ ,\ m\ H_2O)$$

La présence d'alumine fait qu'une partie de silicium est remplacée par de l'aluminium dans les C-S-H.

L'hydratation des ajouts pouzzolanique est très lente, elle est observée à long terme.

I.1.7 Impacts environnementaux liés à la fabrication du ciment

La fabrication du ciment, nécessite une grande quantité d'énergie et provoque un dégagement significatif de C_2O dans l'atmosphère, il a été prouvé que l'industrie de ciment est responsable de 5 à 7% des émissions de gaz à effet de serre **[11] .**

I.1.7.1 La source de CO2 dans l'industrie cimentière

En cimenterie, plusieurs sources d'émissions de CO_2 (dioxyde de carbone) sont identifiables, toutes liées au processus de fabrication du ciment **[11]** :

L'utilisation des combustibles fossiles et de substitution : C'est ce que l'on appelle le CO_2 énergétique direct qui présente 37% d'émissions de CO_2 dans le secteur du ciment.
L'utilisation de l'électricité, principalement dans les installations de broyage :
C'est le CO_2 énergétique indirecte qui présente 6% d'émissions du CO_2.
Le processus chimique : Dans le four a clinker, le calcaire est soumis à des températures très élevées, et subit une réaction chimique appelée calcination ainsi le calcaire se décompose en chaux, et en CO_2, appelé CO_2 de procédé, il présente 57% d'émission de CO_2 du secteur cimentier.

I.1.7.2 Réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie du ciment

La réduction des émissions de gaz à effet de serre, est dû principalement à la réduction d'émission de CO_2, qui est aujourd'hui un enjeu planétaire souligné par les accords Kyoto. Face à ce constat, depuis de nombreuses années, l'industrie cimentière a mis en place des mesures pour réduire ses émissions. En particulier les actions suivantes : **[12]**

- Incorporer des matériaux sélectionnés déjà décarbonatés , exemple de calcaire dans les matières premières.
- Incorporer des additions minérales (cendre volantes, métakaolin, laitiers de hauts fourneaux,…) dans les ciments, réduit la quantité du clinker. Ce qui permet de réduire également les émissions de CO_2 énergétique direct.

L'industrie du ciment, a mis en œuvre plusieurs voies qui permettent de réduire les émissions de CO_2. D'où dans ce travail on s'intéresse au procédé qui permet de remplacer une part du ciment par l'incorporation des additions minérales, qui sont des rejets.

I.1.7.3 Protection de l'environnement

L'industrie cimentière participe depuis plusieurs années à l'effort collectif qui doit être sans cesse fourni pour améliorer la gestion du patrimoine naturel par **[13]** :

- **Valorisation énergétique :** les cimentiers sont des énergivores. Heureusement que le processus de fabrication des ciments permet d'utiliser des combustibles de substitution en les remplaçant par des combustibles fossiles (charbon, fioul lourd,…). C'est ce qu'on appelle la valorisation énergétique.
- **Valorisation matière :** La valorisation matière est un processus qui permet de tirer avantage en cimenterie, des déchets issus d'autres industries. Dans les cimenteries cette substitution est particulièrement importante et intervient à trois niveaux :
  - Au niveau de la fabrication du clinker.
  - Au niveau de la mouture.
  - Au niveau des ajouts.

I.1.7.4 Protection des eaux

Les cimentiers ont pris des dispositions pour limiter cet impact en mettant en place des systèmes de gestion responsables de l'eau dans les carrières.

I.1.7.5 La réhabilitation des carrières

Les permis d'extraction ou permis unique, nécessaire à toute exploitation, prévoient des obligations de remise en état des sites exploités. Les cimentiers les respectent et les appliquent.

I.1.7.6 Réduction de la consommation énergétique et l'émission de CO_2

La fabrication de ciment en Algérie est responsable d'importante émission de CO2 et d'une forte consommation d'énergie. La nature des énergies consommées (gaz naturel) bien qu'elle soit moins polluante mais elle augmente le cout globale de la production.
La réponse à la problématique énergétique se traduit par les actions suivantes **[13]** :

- Trouver des sources d'énergie alternatives aux énergies fossiles.
- Rationaliser l'utilisation de l'énergie par:
  - Un respect strict de la règlementation.

- Une volonté gouvernementale par la réponse au **Plan Énergie Climat à l'horizon 2020.**
  - + 20% d'efficacité énergétique.
  - + 20% des énergies renouvelables dans le mix énergétique.
  - 20% d'émission de gaz à effet de serre

I.1.8 Les matériaux de remplacement de ciment

Ces matériaux de remplacement proviennent principalement de la nature, des centrales thermiques à charbon, des sous produits de l'industrie métallurgique, la norme NF EN 197-1 **[2],** les classes en ajouts minéraux inertes et actifs, qui se divisent selon leur réactivité comme le montre **le Tableau I-3** ci-dessous :

Tableau I-3 : Classification des ajouts selon leur réactivité

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement Réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement Réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées)
Inerte	Faiblement Réactif	Fillers (farine calcaire,…) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique
	Non réactif	

I.1.8.1 Les ajouts minéraux inertes

Ce sont des matériaux qui ne présentent aucune réaction chimique avec les composantes du ciment Portland. Ils sont naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés, mais qui améliorent les propriétés physiques du ciment par leur composition granulométrique. Parmi ces ajouts on distingue les fillers calcaires et les fibres.

I.1.8.1.1 Les fillers calcaires

Les fillers calcaires sont des produits finement divisés. Obtenus par broyage des roches naturelles (calcaires, basalte, etc.), avec une teneur de carbonate de calcium CaCO3 supérieure à 75%.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de CaCO3, sinon il est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Dans le commerce, les fillers sont désignés comme des poudres très fines à granulométries contrôlées, les plus gros grains ne dépassent pas 80 µm.

Les fillers se différencient les uns des autres par : leur origine (roche), leur composition chimique et minéralogique, la forme des grains, leur finesse, leur dureté, et porosité, ainsi que les impuretés qu'ils contiennent.

I.1.8.1.2 Les fibres

Les fibres sont comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variables.

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leurs origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leurs formes (droites, ondulées, aiguilles, …), leurs dimensions (macro ou micro-fibre), et aussi leurs propriétés mécaniques.

Les différentes fibres disponibles peuvent être classées selon leur origines en :

- Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose.
- Fibres synthétiques d'origine minérale : verre, carbone, fibre métalliques.
- Fibres synthétiques organiques : polypropyléne, polymides, tevlar, aramide.

I.1.9. Les ajouts minéraux actifs

I.1.9.1 Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels, définis comme étant des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes entre eux-mêmes, en présence d'eau et a température ordinaire se combinent avec la chaux et forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes. Les normes françaises définissent les pouzzolanes entrants dans la fabrication du ciment comme suite **[14]:**

- **Pouzzolane naturel** : est un produit volcanique composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, il a des propriétés pouzzolaniques pouvant être d'origine volcanique (verre volcanique, tufs, ponce) ou d'origine sédimentaires (terre a diatomées, diatomite).
- **Pouzzolane artificiel** : C'est une matière qui été produite lors du traitement thermique des roches tel que l'argile, schiste, latérite, bauxite, ayant les propriétés pouzzolaniques de ces dernières.

I.1.9.2 La fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines, caractérisés par une grande surface spécifique et un petit diamètre inférieur à 0.1µm, présentant une forte teneure en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté, par du charbon dans les fours à arc électrique, utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium.

I.1.9.3 Le laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau ou le laitier broyé, et un produit de la fabrication de la fonte, brusquement refroidi par aspersion d'eau. C'est un matériau lorsqu'il est activé devient hydraulique. Il se présente sous forme de nodules, dont sa composition chimique comporte de l'oxyde de calcium, avec des proportions de l'ordre de 40 à 50%, entre 25 à 35% de silice et 12 a 30% d'alumine, ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en faible quantités ; tous ces composés sont semblables à ceux du clinker.

Les laitiers ont une composition chimique relativement constante à laquelle un métallurgiste porte une certaine attention, puisque tout écart par rapport à cette composition optimale, se traduit en augmentation des couts énergétiques assez importants par conséquent la fabrication de la fonte devient plus coûteuse.

Le laitier se fond à une densité beaucoup plus faible (2.8) que celle de la fonte qui est supérieure à 7.0, de telle sorte que le laitier fondu flotte au dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau, et c'est la ou on peut soutirer les deux liquides séparés.

Ce dernier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après co-broyage avec le clinker. Le laitier craint la dessiccation par ce qu'il retient moins bien l'eau que le ciment Portland.

I.1.10 Les avantages des ajouts minéraux

Utilisation des déchets industriels et des ressources naturelles est devenus une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment portland. Les ajouts permettent d'améliorer les caractéristiques ou de conférer des propriétés spécifiques au béton et permettent d'obtenir des avantages économiques, écologiques et techniques suivants **[14]** :

- **Avantages économiques** : le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, qui demande une grande énergie de fabrication. La plupart des matériaux susceptibles de remplacer le ciment dans le béton sont des sous-produits et demandent moins d'énergie alors moins coûteux que le ciment. La distance entre la source des ajouts cimentaires et l'utilisateur final plus le coût du transport, risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. Le prix des ajouts pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le CO_2, et c'est bien le gaz carbonique qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées
- **Avantages écologiques** : La production d'une tonne de ciment libère dans l'atmosphère une quantité de gaz carbonique quasi équivalant, De fait, le remplacement du ciment Portland par les ajouts cimentaires réduit les émissions de CO_2. L'utilisation de cendres volantes, de fumées de silice et le métakaolin comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte d'énergie. Par contre le laitier provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de CO_2 par tonne de LGHF (laitier granulé)

I.1.11 l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la Consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile+calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de cet ajout. La réaction pouzzolanique étant à base de produits de faible coût et la durabilité est garantie puisque les romains utilisaient déjà ce mécanisme chimique dans leurs ciments pour la confection d'ouvrages qui ont fait leur preuve de puis de nombreux siècles. Des sous-produits industriels tels que les cendres volantes et fumées de silice condensées sont de plus en plus utilisées dans les pays industrialisés parce qu'ils sont des déchets d'usine. Contrairement aux pouzzolanes naturelles, il n'est pas nécessaire de les pulvériser ou de les soumettre à un traitement thermique avant de s'en servir. Plusieurs pays comme la Chine, la Grèce, l'Italie, l'inde et le Mexique, utilisent

encore des millions de tonnes de pouzzolanes naturelles pour fabriquer des ciments CPA. Pour des raisons d'épargne d'énergie, il y a tout lieu de croire que l'utilisation de ces matériaux se poursuivra et se développera de plus en plus**.**

. Conclusion

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables. En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

PARTIE 2 : Généralités sur Les argiles

Introduction

L'argile est le plus ancien matériau minéral utilisé par l'homme pour la construction, la poterie, la fabrication de briques. L'argile est actuellement l'une des plus importantes matières premières industrielles : ciment, céramiques, revêtement réfractaire... à cause de ses propriétés importantes.

I.2.1. Définition d'argile

De manière générale, le mot argile sert à désigner l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 2 µm. En termes de taille de grain, le mot argile à deux sens. Il désigne d'abord les particules faites des minéraux argileux dont les cristaux excèdent parfois 2 µm. Les minéraux argileux proviennent essentiellement de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Cette altération chimique agit de façon que certains minéraux silicates, comme les micas ou les feldspaths sont transformés en d'autres espèces minérales (kaolinite, illite, Montmorillonite), souvent de granulométrie plus fine. Les minéraux argileux sont surtout de la famille de silicates, formés à base de silice (Si) et d'oxygène (O), tels que le quartz et les feldspaths. Le mot minéral argileux comprend les minéraux qui font partie du groupe des phyllosilicates, appelés aussi silicates de structure lamellaires.

Le terme argile désigne ensuite les débris les plus fins de la désagrégation-altération physique des roches appelés la farine de roche (d<2µm).Cette farine peut contenir une proportion de minéraux argileux plus ou moins importante **[16].**

I.2.2 .Origine d'argile

Il s'agit de minéraux formés au cours des temps géologiques par altération de diverses roches silicatées de surface ou de proche surface, selon les conditions locales d'hydratation, de drainage, d'hydrolyse et de pression, et selon les climats. Les argiles sont le devenir de ces roches lorsque, remontant des profondeurs par le jeu de la tectonique des plaques, elles se font agresser par les dures conditions de la surface : oxygène, gaz, carbonique, variations de température, ruissellement. Ce sont des structures qui se sont adaptées à ce changement de milieu : les roches se réorganisent en se structurant davantage, puisque les silicates d'alumine sont des cristaux, un motif répétitif de silice SiO_2, d'alumine Al_2O_3 et d'eau H_20 **[15].**

I.2.3.Classification

Différentes classification des phyllocilicates été proposées. La première se base uniquement sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième prend en compte la localisation des substituant, leurs distributions et le type des cations compensateurs et la troisième sur la couleur **[18]**.

La classification la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi quatre groupes :

Minéraux à 7 A° : Le feuillet est constitue d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique .Il est qualifie de T : 0 ou 1 :1 , son épaisseur est d'environ 7 A°.

Minéraux à 10 A °: Le feuillet est constitue de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. T il est qualifie de T : 0 : T ou de type 2 :1 , son épaisseur est d'environ 10 A°.

Minéraux à 14 A° : Le feuillet est constitue de l'alternance de feuillets T : 0 : T et de couches octaédriques inter foliaires.

Minéraux inter stratifies : L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci -dessus .La valeur de la charge permanente du feuillet à servi de critère pour établir une classification des phyllosilicates 2 :1 **[18]**.

I.2.4 Principaux groupes d'argiles

Les groupes d'argiles les plus importants sont :

- **Kaolin**

Le kaolin est une roche constituée principalement de kaolinite. Cette argile blanche, douce, friable, réfractaire, contient autant d'aluminium que de silice **[19]**.

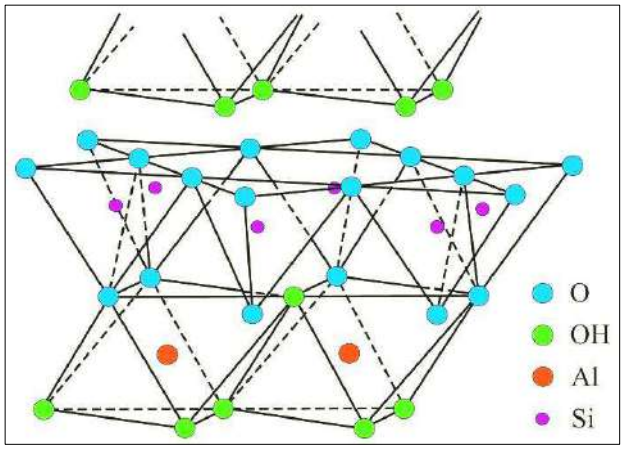


Fig. I.02. Structure de la kaolinite **[30] .**

- **Smectites**

Cette famille d'argile regroupe les montmorillonites, les bentonites, les saponites, les nontronites, les beidellites,... **[20]** Ces différentes argiles sont connues pour leur capacité à piéger les molécules d'eau.

- **Montmorillonite**

Argile la plus communément récoltée, elle est généralement vendue verte mais peut-être trouvée sous d'autres coloris : grise, blanche et bleutée **[21]**.

- **Attapulgite ou Bentonite**

Argiles attapulgite ou bentonite, ont un fort pouvoir absorbant. Retrouvées dans la composition de pansements gastriques, dans le traitement d'ulcère de l'estomac, constipation, diarrhée, reflux gastrique **[22]**.

- **Illites**

La composition d'illite est riche en calcium (14%), en fer (9%) et pauvre en magnésium. Elle présente un bon pouvoir d'absorption environ 25 % de son poids et un faible pouvoir d'adsorption**[23]**.

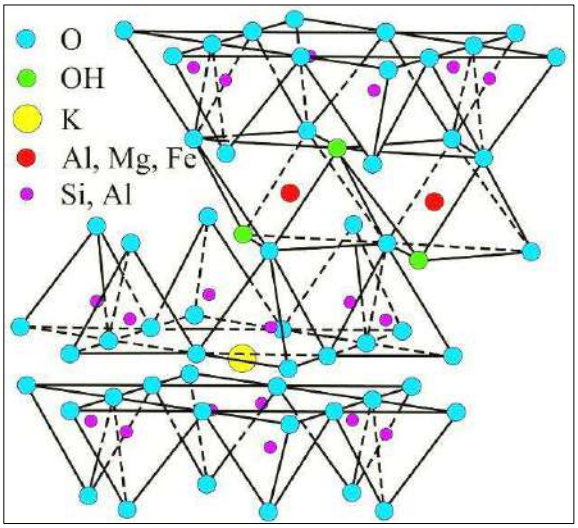


Fig. I.03. Structure de l'illite **[30] .**

Vermiculites

Les vermiculites sont des argiles ayant une origine volcanique, riches en magnésium **[24]**.

Chlorites

Ce nom leur a été attribué pour leur couleur verdâtre, du grec « chloros » signifiant vert. Des chlorites de couleur jaune, rouge ou blanche sont également retrouvés **[25]**.

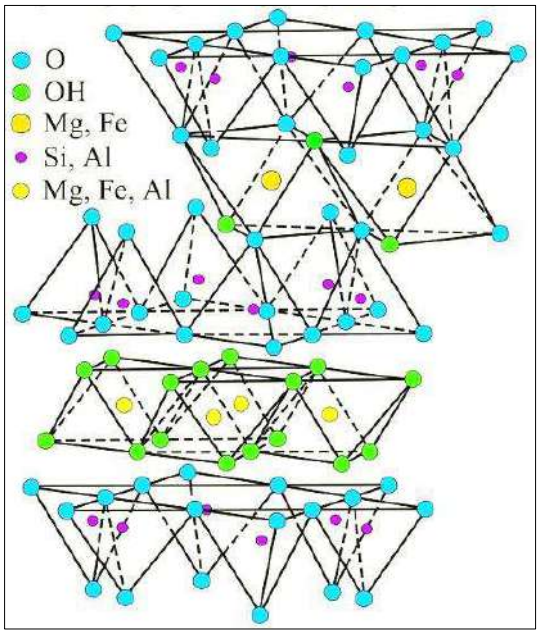


Fig. I.04. Structure du chlorite **[30].**

- **Minéraux argileux inter-stratifiés**

C'est le nom donné aux argiles dont la structure par alternance de feuillets de natures différentes correspond à une étape de transformation d'un minéral argileux à un autre **[26]**.

I.2.5 Principales couleurs d'argiles

Les argiles ne sont pas identifiées par leur couleur. Une couleur peut être attribuée à plusieurs types d'argiles, la couleur verte par exemple est retrouvée chez la montmorillonite, l'illite ou encore la chlorite,… La variation de couleur constatée est **fonction de la concentration en oxyde de fer. [P. Villieras, 2008, page 16]**

- **Verte**

Les argiles vertes présentent une faible teneur en fer, ce sont généralement les montmorillonites, les illites et les smectites.

- **Blanche**

Ces argiles ne contiennent aucune substance colorée. Leur formation n'a donc pas été perturbée, elle a été uniforme. On retrouve le plus souvent des kaolinites mais également des smectites. **[D. Merabet,, H. Belkacemi, octobre 2003]**

- **Rose**

Ces roches argileuses ne sont pas retrouvées au naturel, telles quelles. Il s'agit d'un mélange d'argile rouge et d'argile blanche. Ce mélange a pour but d'augmenter la concentration en oligo-éléments de l'argile blanche tout en diminuant la concentration en **fer de l'argile rouge. [N. Cousin, 2013, page 31]**

- **Rouge**

Généralement des illites, ces argiles sont riches en oxyde de fer. **[P. Ségalen, 1969, pages 225-236]** Très reminéralisantes, elles sont idéales en usage externe pour les peaux irritées, fatiguées ou ternes qu'elles adoucissent et purifient .

- **Jaune**

Ces illites riches en oxyde de fer et magnésie **[P. Ségalen, 1969, pages 225-236]** vont apaiser de nombreuses douleurs (articulaires, musculaires) et tonifier la peau. Appliquées en masques, la peau et les cheveux normaux l'apprécient tout

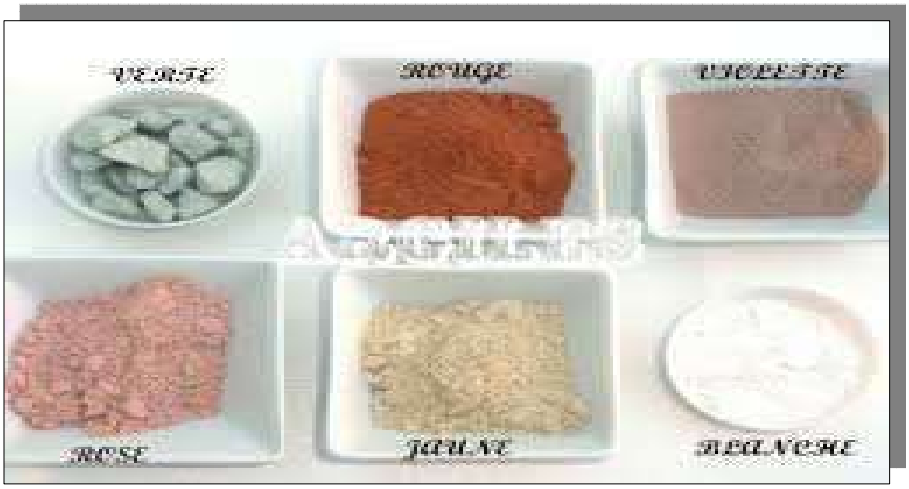


Fig. I-05 Les différents types d'argiles

I.2.6.Caractéristiques physico-chimiques

❖ **Absorption et adsorption**

L'intérêt des argiles en thérapeutique est lié à leurs propriétés de surface et réactivité qui leur confèrent des propriétés d'adsorption, chélation et capture des particules externes, ainsi qu'à leur capacité d'absorption, aux propriétés spécifiques des silicates et des alumines qui les composent, et à celles de leurs ions de compensation.

❖ **L'absorption** est la propriété que présentent les solides et les liquides de retenir certaines substances (gaz ou liquides) dans la totalité de leur volume (comme dans une éponge).

❖ **L'adsorption** est un phénomène de surface par lequel des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides (adsorbats) se fixent sur une surface solide (**adsorbant**) selon divers processus plus ou moins intenses. Un atome adsorbé est un adatome. Ce phénomène a une très grande importance dans l'évolution de nombreuses réactions chimiques **[15]**.

❖ **Ionisation**

Des substitutions d'atomes, par exemple substitution d'aluminium par du fer ou du magnésium dans les couches octaédriques, ou substitution de silicium dans les couches tétraédriques, surviennent dans ces minéraux au cours de leur formation.

❖ **Surface spécifique**

La surface spécifique des silicates d'alumine hydratés est considérable. En effet, en milieu liquide les particules d'argile ne s'entassent pas en conglomérats, mais s'étalent sous forme d'un film continu.

❖ **Adhérence et capacité de fixation**

Lorsque les feuillets d'argile se fixent sur un support, l'adhérence qui en résulte est efficace.

❖ **Cavités hexagonales**

En surface des argiles, l'arrangement des oxygènes et des tétraèdres conduit à la formation de cavités de forme hexagonale**,** zones basales vides d'électrons, qui ont une importance notable car elles facilitent l'interaction avec des molécules ou des ions extérieurs.

La superposition des cavités hexagonales des feuillets crée un couloir électrostatique, dont le rôle peut-être déterminant en thérapeutique.

❖ **Echanges d'eau**

La réactivité des argiles en milieu aqueux est aussi corrélée à la capacité d'échange d'eau. Celle-ci est plus ou moins étroitement liée à la structure :

Eau libre entre les particules (macroporosité, capillarité, eau dite hygroscopique) ;

Eau captée entre les différents feuillets par les ions de compensation (nanoporosité, eau dite d'hydratation), et qui permet l'écartement de ces mêmes feuillets ou « gonflement » ;

Eau intégrée à la structure même des feuillets (hydroxyles, eau dite de constitution ou de cristallisation), qui ne sera libérée que lorsque celle-ci seront détruites, par une trop forte cuisson **[15]**.

I.2. 7 Composition chimique

Actuellement, les chercheurs s'intéressent tout particulièrement aux échanges de macro et micro éléments véhiculés par les argiles. Les travaux de Louis Camille Maillard, avaient mis en évidence le fait que le soufre, lorsqu'il est sous forme colloïdale, peut être absorbé à 100% par les organismes vivants, contrairement à la forme neutre amorphe ou cristalline. La forme colloïdale le rendrait aussi biodisponible que lorsqu'il est ingéré dans les acides aminés soufrés.

Lorsqu'elles sont en suspension, les argiles sont des colloïdes, et en tant que tels semblent servir de banque d'échange pour tous ces éléments .Des recherches portent aussi sur le rôle des argiles en tant que condensateurs énergétiques, car les charges portées par les feuillets superposés sont très proches mais ne se touchent pas. Il semblerait que les silicates d'alumine agissent à la manière de nos enzymes, orientant les molécules, facilitant leurs rencontres tout en leur imposant une forme en « 3D » particulière (stéréochimie), dans un rôle de biocatalyseurs **[15]**.

I.2.8.Extraction et traitement

- **Extraction**

Les minerais d'argiles, exploités la plupart du temps à ciel ouvert, sous forme de gisements plus ou moins important, peuvent être de couleur uniforme ou différente. Une couche rouge peut facilement se retrouver sous une couche verte, blanche ou encore jaune. Après avoir déblayé la récolte, on met à nu l'argile des éléments indésirables, étape de tri des roches diverses. Elle est ensuite sélectionnée, analysée, puis transportée sur un air de séchage en béton où on va l'étaler au soleil. Ce mode de séchage dit « naturel » va lui permettre d'emmagasiner l'énergie des rayons solaires. Elle est triée une seconde fois manuellement pour éliminer les différentes impuretés résiduelles. L'étape suivante de la récolte est le broyage afin d'obtenir une granulation homogène. Ce broyat est mouillé d'eau de source, il en ressort une pâte. Cette pâte est alors pressée entre des toiles pour en faire des "pâtons" de 10 kg. Ces derniers sont mis à sécher au soleil, puis concassés. L'argile apparait sous forme de granulés, qui se dispersent rapidement, utilisés en usage externe. L'argile sur fine est traitée de façon à être totalement exempte de sable. Ce traitement rend sa texture plus délicate et agréable à utiliser que la précédente. Elle est obtenue par concassage dans un micronniser en fine poussière. Ce processus permet d'éliminer les impuretés ayant échappé aux deux premiers triages **[29]**.

- **Traitement**

Les argiles naissent du sol en constant mouvement. Elles apparaissent selon trois grands processus de formation, juxtaposables. Le premier est relatif à la simple décomposition des roches par érosion. Les phénomènes caractérisant une érosion des sols sont nombreux. La pluie, le vent, le gel, le dégel, les vagues et bien d'autres sont autant de phénomènes naturels à l'origine de la formation des argiles. Le deuxième processus est appelé néoformation. Ceci correspond à la formation du minéral. Par combinaison, des

substances transportées par l'eau du sol vont, par combinaison, s'arranger pour former une structure minérale. Le troisième mécanisme correspond au processus de transformation des minéraux évoluant par dégradation (perte d'équilibre du sol) ou aggradation (accumulation de sédiments dans un cours d'eau par excès de transport par l'eau) d'ions minéraux argileux **[27]**.

Les roches argileuses sont présentes presque partout à la surface de la planète, mais leurs propriétés et leur composition diffèrent selon les conditions dans les quelles elles se sont formées. L'altération de diverses roches, de part les temps géologiques, sont à l'origine des différentes argiles. C'est un ensemble qui caractérise l'argile, le type de roche dont elle est issue, le climat, la topographie du sol,… Un climat froid provoquera une altération faible de la roche. Les minéraux

argileux auront donc une composition similaire à celle des minéraux provenant de la roche d'origine. C'est le cas des illites et des chlorites. Un climat à la fois chaud et humide va entrainer une forte hydrolyse voyant l'obtention des kaolinites et des smectites. Un climat tempéré verra un processus d'altération dit modérer s'opérer sur la roche. Il en résultera la création d'argiles de type sillites, chlorites ou encore vermiculites. La topographie des sols peut également jouer un rôle dans la composition de l'argile. Une zone pentue prévoit un fort drainage de l'eau, entraînant la formation de kaolinite. Inversement, un milieu confiné, comme retrouvé dans les cuvettes, produira des smectites par phénomène de concentration. Ces différents processus de formation des argiles sont dits d'altération. Les argiles provenant de la dégradation des roches sont des argiles résiduelles. Les roches vont s'accumuler par érosion éolienne ou hydrique entrainant la formation des argiles

[16].

Les argiles fibreuses quand à elles proviennent de croutes de calcaires. Ces zones présentant un climat sec, sont riches en sels. Elles peuvent se former en solution, par une richesse ionique.

Une argile néoformée peut évoluer avec son milieu. La transformation va se réaliser par soustraction ou fixation d'ions. Une kaolinite peut donc devenir un chlorite des smectites, des illites

[17].

I.2.9.Les différentes formes galéniques

Il est possible d'utiliser l'argile sous forme de poudre, de pâte, de morceaux et de comprimés ou de gélules.

- **La poudre**

Compose simple d'argile à différent forme

- argile « ultra-ventilée » : composée de grains extrêmement fins. C'est l'argile utilisée pour la voie interne.
- argile ventilée ou surfine : a un grain un peu plus épais que la précédente, utilisée pour les soins d'hygiène corporelle et de beauté (composition de shampoing faits maison, masque de beauté, soins capillaires…), on peut également s'en servir pour préparer de l'eau argileuse.
- argile fine : grains plus épais utilisés pour la confection de compresses ou cataplasmes.

- **La pâte**

Composée simplement d'argile déjà humidifiée. Elle est prête à l'emploi. Plus simple et pratique à utiliser donc plus chère !

- **Morceaux d'argile**

Fragmentables en plus petits morceaux, ils sont principalement utilisés pour les cataplasmes plus étendus, exigeant plus de matière. Dans certaines pharmacies ou certains magasins spécialisés, on peut trouver des Comprimés ou gélules à base d'argile. Plus confortable à avaler pour ceux que l'eau argileuse rebute un peu. Néanmoins, ces spécialités sont souvent des mélanges de différents compléments alimentaires **[29]**.

I.2.10.La Calcination

La calcination est une technique de préparation d'échantillon effectuée en présence d'air sur une matière. Elle est utilisée en métallurgie pour la transformation des métaux en toutes sortes de dérivés, ou pour la transformation du calcaire en chaux. Cette technique provoque des réactions physiques et/ou chimiques et met ainsi l'échantillon dans un état de référence.

I.2.10.1 La calcination flash

La calcination flash, est une calcination très rapide de quelques dixièmes de secondes deux secondes environ. Le four flash présente une chambre où un grand volume d'air circule. Le flux tourne à grande vitesse et maintient les particules en suspension, dans la partie du four où la transformation thermique est souhaitée. A la fin les particules retombent et refroidissent très rapidement. Dans leur travail San Nicolas et al. **[37]**, expliquent le fonctionnement d'un four flash d'un producteur de Métakaolin. Au cours de la première étape, un courant d'air chaud ascendant prend l'argile séchée sur un tamis de 200 µm, d'où il est introduit dans le four de calcination (Figure II-08). Les particules d'argile tournent autour de la flamme (qui a une température comprise entre 1000 et 1200 ° C), quelques dixièmes de seconde, assez de temps pour atteindre 700 °C, avant d'être envoyé aux cyclones de refroidissement rapide à 100 °C.

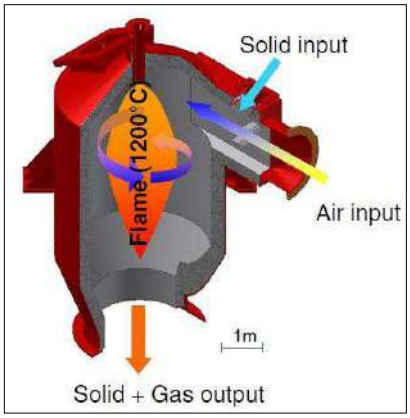


Fig - I-06 : Représentation d'un four flash pour la production du métakaolin**.[30]**

Bien que la cinétique de nombreuses transformations physiques et chimiques à l'intérieur d'un solide à haute température sont assez rapides, les conditions flash peuvent engendrées des transformations peuvent être incomplète, à cause du refroidissement brusque et la gelée de la cinétique de changement **[30].** La forme de la matière introduite et généralement pulvérulente en suspension dans un gaz, alors que les fours rotatifs, la matière ou le solide est sous forme de boulet.

I.2.10.2 La calcination traditionnelle

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 1400°C et 1500°C) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures).

En cimenterie, le four est un tube en acier (avec revêtement intérieur de briques réfractaires) de 4 à 5 m de diamètre et de 50 à 90 m de long dans le procédé par voie sèche (150m pour la voie humide), en appui sur des roulements allant jusqu'à huit. Il est légèrement incliné (3.5% par rapport à l'horizontale). Le four tourne à des vitesses de rotation comprises entre 1 et 4tr/min.

La matière solide pénètre à l'amont du four où s'achève la décarbonatation et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (environ 1450 °C). Le temps de parcours est de l'ordre d'une heure. Le cycle de traitement est comme suit **[32]:**

*La décomposition des argiles qui s'effectuent au-dessus de 500 °C.

*La décarbonatation du calcaire qui se situe à 950 °C.

*La clinkérisation à 1450 °C qui se produit en partie aval du four.

I.2.11. Domaines d'études des argiles

Les minéraux argileux et les argiles sont étudiés dans de nombreux domaines:

Pour les géologues, les argiles apportent des informations sur les conditions environnementales (source, condition de formation, diagenèse...).

- Les ingénieurs pétroliers déduisent les conditions thermiques des gisements (degré de maturation).
- Les ingénieurs civils s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matériel industriel (réfractaires, matériaux de construction).
- Les agronomes analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants.

PARTIE 3 : Généralités sur Les mortiers

Introduction

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon **[Bouali .[33]**

I.3 .1 Définition de mortier

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, se diffèrent selon les réalisations et d'adjuvant. Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types ainsi que les caractéristiques principales telles que l'ouvrabilité, la prise, le retrait, etc. **[BOUALI .K [33]**

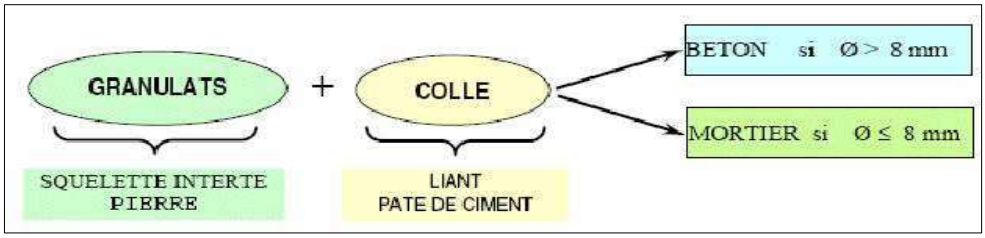


Fig- I .07 : Constituants des mortiers **Bouali [33]**

I.3.2 Types de Mortier

Dans les travaux publics et les Travaux de bâtiment on kutilise plusieurs types de mortier selon l'ouvrage à réaliser et de son environnement :

A. Mortier du ciment

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur1 ciment est environ 0,35 ; Les dosages courants sont de l'ordre de 300 a 400 kg de ciment pour de sable **[31].**

B. Mortier de chaux hydrauliques

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments **[31].**

C. Mortier Bâtards

Les mortiers bâtards sont constitués par des mélanges de ciment et de chaux avec du sable, dans des proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico -calcaires ; leur granulométrie est de préférence continue **[31].**

D. Mortier fabriqués sur chantier

C'est encore le cas très souvent pour des menus travaux; le plus grand soin doit être apporte tant au stockage qu'au mélange des constituants qui seront choisis en fonction de l'ouvrage à

réaliser : type et classe du liant, nature et granulométrie du sable, dosage en eau, nature des adjuvants.

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner.

Le sable est le plus souvent roulé (nature silico -calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids, soit en volume. Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnem ent des sables **[31].**

E. Mortier de hourdage de maçonnerie

On utilise des sables dont les grains les plus gros n'excèdent pas 5 mm, le dosage le plus usuel est de 1 volume de liant pour trois volumes de sable. La quantité d'eau qui joue un rôle important ne peut être fixée à priori, en règle générale on adopte une valeur voisine de la moitié du poids du liant qui peut être réduite lorsqu'on utilise un plastifiant **[31].**

F. Mortier colle

Le mortier colle regroupe la famille des mortiers adhésifs destinés à colle r un revêtement comme :

- le carrelage.
- le dallage.
- certains blocs de maçonnerie.

Si le mortier colle est parfaitement adapté pour le collage des céramiques, il est tout de même possible de les coller à l'aide de mortier-ciment ou de mortier chaux sous certaines conditions **[31].**

G. Mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

Depuis quelques années est apparue une nouvelle génération de mortiers livrés par les centrales de béton prêt à l'emploi : les mortiers frais retardés et stabilisés. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante.

On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 24 heures sans avoir le souci de préparer de nombreuses petites gâchées. Très maniables et homog ènes, ils possèdent des résistances très largement suffisantes pour les travaux auxquels ils sont destinés : maçonnerie et jointoiement. Lorsqu'ils sont étalés en couche mince, la prise de ces mortiers est accélérée (effet d'absorption d'eau par le support et perte par évaporation).

Ces mortiers permettent, comme le béton prêt à l'emploi, de simplifier et d'améliorer les conditions de travail, en évitant les pertes de temps **[31].**

H. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins **[31].**

I. Mortier de résine

Ils utilisent des résines synthétiques, en particulier le polyester ou l'époxyde **[31].**

J. Mortier de fibres

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissura blés. Ce sont soit des mortiers pré mélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales **[31].**

I.3. 3 Structure de MAP

Le rôle de l'expérimentateur ainsi que la démarche expérimentale de l'élaboration sont deux éléments importants, compte tenu de la sensibilité du comportement de cette dernière. La pâte de ciment est confectionnée à partir des quatre composantes (ciment, filler, plastifiant, eau) .**Guellil] [36]**

A. Un volume de pâte élevé

Les frottements entre les gravillons limitent l'écoulement des bétons. C'est pourquoi, le MAP contient un volume de pâte important dont le rôle est d'écarter les gravillons les uns des autres **[AFGC]. [37]**

B. Une quantité importante de fines

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les MAP contient une quantité de fines supérieures à celle des mortier. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation ainsi que pour abaisser leur coût global, le liant est souvent un composé binaire [Yurugi & al.],**[38]** voire ternaire [Tangtermsirikul & al.] ; **[39]** ciment portland mélangé avec cendres volantes, laitier, fillers calcaires, pouzzolanes naturelles, ou fumée de silice.

C . Un fort dosage de superplastifiant

L'introduction de dosage relativement important de superplastifiant dans les BAP permet en premier lieu de réduire la teneur en eau tout en conservant leur grande maniabilité. Toutefois, un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation **[de Larrard & al.]** peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

D. Une utilisation éventuelle d'agent colloïdal

Bien que ce ne soit pas systématique, les BAP contiennent la plus part du temps un agent colloïdal **[Sedran].** Ce produit, comme les fines, a pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ce produit semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Il semble par contre inutile dans le cas de MAP ayant des rapports massique eau/liant faible qui donne des résistances supérieures à 50 MPa. Pour la gamme des bétons intermédiaire, leur utilité est à étudier au cas par cas.

L'agent colloïdal a la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis aux problèmes ségrégation et ressuage [Kuroiwa & al.] & [Shindoh & al.].

I.3.4 Méthodes de formulation

- **Méthode d'Okamura**

La formulation des MAP par l'approche développée à l'université de Kochi au Japon [Okamura et al. 1999, 2000 et 2003] se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Cette méthode de formulation est à la fois forfaitaire pour les dosages des granulats et expérimentale pour le dosage en eau et en adjuvant. Pour formuler un BAP par cette méthode baptisée **« méthode japonaise »**, on doit passer par les étapes suivantes :

a- Choix du dosage en ciment : La quantité du ciment dépend du cahier des charges et des performances désirées (résistance, durabilité…).

b- Désignation du volume d'air : Le volume d'air occlus est pris égal à 2 %.

c- Détermination du dosage du sable : Le volume de sable est posé forfaitairement égal à 40% du volume du mortier.

d- Détermination du dosage minimal en eau : La demande en eau passe par la conception de la composition de la pâte. En effet des essais d'étalement au mini- cône sont réalisés en faisant varier le rapport Eau/Liant avec le dosage choisi en liant.

En traçant la courbe d'Eau/Liant en fonction de l'étalement relatif « Rp » (équation.1), on détermine le point d'intersection avec l'axe des ordonnées « βP» qui permet de déterminer le besoin en eau minimale nécessaire pour le ciment et les additions minérales [Okamura et al. 1999 ; Domone et al. 1997].

$$Rp = \frac{d^2 - 100^2}{100^2} = \left(\frac{d}{100}\right)^2 - 1$$

Avec « Rp » l'étalement relatif et « d » le diamètre d'étalement moyen de la galette de pâte.

I.3. 5 Caractérisation de MAP à l'état frais

I.3. 5.1 Fluidité et déformabilité de MAP

La déformabilité du mortier est définie comme étant la capacité de mortier de subir un changement de forme sous son propre poids.

Afin d'obtenir une déformabilité adéquate, il est important de réduire au minimum le frottement inter sable du mélange. La réduction de la quantité du gros sable et l'augmentation du volume de pâte sont exigées pour obtenir la déformabilité désirée des MAP. Une autre manière de réduire le frottement inter sable est obtenu avec l'incorporation d'additions minérales telles que les fillers **[Khayat & al.]. [35]**

La déformabilité du béton est directement liée à la déformabilité de la pâte. Pour augmenter la déformabilité de la pâte et réduire le frottement inter sable, des super-plastifiants haut- réducteur d'eau **(SPRE)** sont incorporés dans les mélanges MPA. Ces **SPRE** permettent de maintenir un rapport eau- matières cimentaires (E/L) relativement bas tandis que la fluidité reste élevée. La déformabilité de la pâte est augmentée aussi en réduisant la viscosité. Un mortier fortement fluide peut être obtenu sans réduction significative de sa cohésion en améliorant sa résistance à la ségrégation **[Khayat et al. 2004]. [35] En** général, le critère de fluidité- stabilité est assez difficile à résoudre, mais, au moyen d'agents colloïdaux, de teneurs élevées en ajouts minéraux ou de teneurs appropriés en sable, la stabilité et la déformabilité peuvent être assurées.

III.5. 2 Essais de l'étalement au Mini cône de mortier

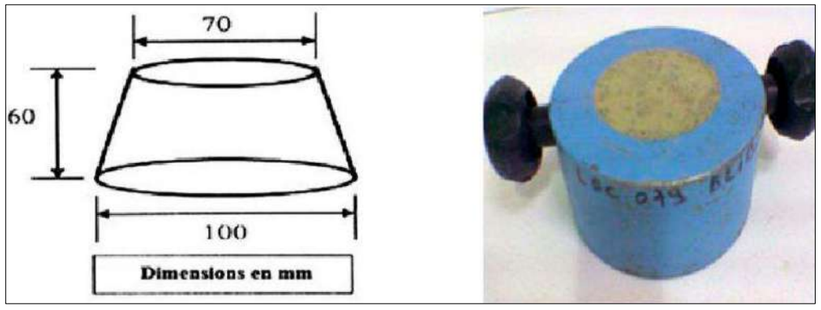


Fig- I .08 : Étalement au Mini cône de mortier

I.3.5.3 Essais de déformabilité de l'Entonnoir en V (V-funnel)

L'essai d'écoulement à l'entonnoir (ou V-funnel test) est utilisé pour évaluer la fluidité et la viscosité des MAP.

Un entonnoir de dimensions définies est rempli de mortier jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, on mesure le temps (Tv) que met le mortier à sortir de l'entonnoir jusqu'à ce que cet entonnoir soit entièrement vide Ce temps d'écoulement, qui doit être compris entre 4 et 10 secondes, caractérise la viscosité du mortier. Si le mortier s'écoule plus rapidement, c'est que sa viscosité est trop faible.

Bien que l'essai soit conçu pour mesurer la fluidité, le résultat est affecté par d'autres propriétés du MAP que celle de l'écoulement. La forme de cône inversée fera bloquer l'écoulement du mortier si, par exemple il y a trop gros granulat. Par contre un temps élevé d'écoulement peut être associé à une faible déformabilité due à une viscosité élevée de la pâte et ou un frottement intergranulaire élevé.

L'EFNARC [EFNARC 2005] définit deux classes de viscosité selon le temps d'écoulement mesuré à l'entonnoir (V-funnel) : Tv ≤ 6 secondes, pour une bonne capacité de remplissage même avec des renforts denses et 9 ≤ Tv ≤ 25 pour les autres cas **Rmili.[32]**

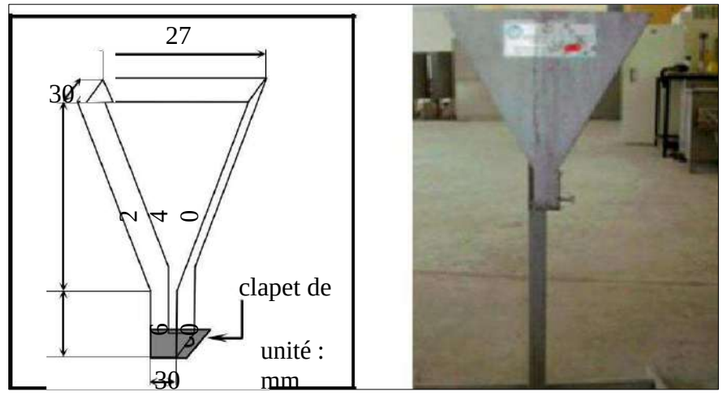


Fig- I.09 : Essai de l'entonnoir en **V[V.FUNNEL]**

Pour connaitre effet des argiles calcinées sur les propriétés du béton/mortier des études antérieur ont réalisé des mortier et des bétons à base des argiles calcinées en faisant substituer une partie du poids de ciment avec déférent taux de substitution et le comparées au mélange de référence.

I.3.6 Effet des argiles calcinées sur l'ouvrabilité des bétons/mortiers

Siddique et Kaur **[40]** ont formulé des betons avec différents pourcentages de metakaolin (MK) (0%, 5%, 10% et 15%) par rapport au volume de ciment.Un rapport E/C et un dosage en superplastifiant (SP) fixe de 0,45 et 4,95 l/m^3, respectivement. Les auteurs ont constaté une réduction de la maniabilité avec l'inclusion de MK. Le mélange contenant 15% de MK donne la maniabilité la plus faible.

Khatib **[41]** montre aussi que le remplaçment partielle du ciment dans les mélanges de béton par le MK diminuer l'ouvrabilité du béton avec l'inclusion de MK. La réduction de l'ouvrabilité augmente avec l'augmentation du contenu MK.

Li et Ding **[42]** ont remplacé partiellement le ciment par 10% de MK avec même dosage de SP et au même rapport E/C de. Ils ont indiqué que la fluidité du ciment était devenue plus faible que celle du mélange de référence.

Farshadfar et al **[43]** Ont étudié l'influence de MK sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçant (BAP). Pour cette étude le MK remplacé le ciment a des niveaux 0%, 5%, 10% et 15%, Un rapport E/C poids fixe de 0,38 et différent dosages de SP ont été utilisés. Ils ont trouvé une réduction de la maniabilité avec l'inclusion de MK.

Madandoust et Mousavi **[44]** ont étudié les propriétés à l'état frais des BAP avec le MK il ont noté que le temps d'écoulement augmentait avec l'augmentation de la quantité de MK avec une dosage plus élevée de SP.

Memon et al **[45].** a examiné l'utilisation de la bentonite brute comme ajout cimentaire dans le béton et a découvert que l'ouvrabilité, la densité à l'état frais diminuaient à mesure que la quantité de la bentonite augmentait.

Boddy et al. **[46]** ont réalisé une étude sure effet de rapport E/C et la variation de dosage de SP sur les propritiés à l'état frais de mortier fabriqués avec défférente concentrations de MK (0%, 8% et 12% en poids). Ils ont démontré que les mélanges présentaient une ouvrabilité

plus faible avec un rapport E/C de 0,3, tandis que 12% de MK atteignaient une ouvrabilité supérieure avec un rapport E/C égale 0.4 par apport au mélange de réference et le mélange contenant 8% de MK. De plus il ont indiqué que l'augmentation de concetration volumique de MK augmente le dosage de superplastifiant.

(Sonebi et al., 2013) **[47**]. Moulin et ses collaborateurs (2001) **[48]** ont constaté que l'incorporation de MK peut conduire à une augmentation de comportement thixotrope et demande en eau plus élevée .

Batis et al **[49]** ont déterminé l'effet du kaolin calciné à des niveaux de 0 %, 10 % et 20 % en poids. Les résultats ont montré un temps de prise initiale et finale plus long grâce à l'intrudition de kaolin calciné.

I.3.7 Effet des argiles calcinées sur les résistances mécaniques des bétons/mortiers

A. Résistance à la compression

Bai et al **[50**] .Evalué l'accélération du développement précoce de la résistance du béton à l'aide de métakaolin comme ajout cimentaire.le MK remplacé à des niveaux de 1%, 2%, 3%, 4%, et 5%. Quatre rapports E/C de 0,3, 0,4, 0,5 et 0,6 ont été utilisés. La résistance à la compression à 28 jours indiquait que 5 % de MK présentait la résistance à la compression la plus élevée parmi tous les rapports E/Cétudiée. Avec un rapport E/C de 0,3, l'amélioration de la résistance à la compression à 28 jours était de 0,12 %, 5,52 %, 7,53 % et 10,66 % avec l'inclusion de 1 %, 3 %, 4 % et 5 % de MK, respectivement. De plus l'amélioration de la résistance à la compression avec le rapport E/C était de 14,13 %, 19,33 %, 25,28 %, 39,78 % et 54,27 % avec l'inclusion de 1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 % MK, respectivement.

Dinakar et al **[51]** ont étudié effet de la teneur en métakaolin sur les propriétés du béton à haute résistance .Pour cela le ciment remplacé du MK avec taux de subtitution de 0%, 5%, 10% et 15% en poids,avec un rapport E/C fixe de 0,3 et un dosage en SP variable. Les résultats monrent que 10 % de MK présentaient la résistance à la compression la plus élevée en 28 jours. L'amélioration de résistance était de 4,1 % et 7,55 % avec l'inclusion de 5 % et 10 % de MK, respectivement, tandis que la dimunution de résistance avec 0.9% par l'inclusion de 15 % de MK.

Khatib **[52]** a examiner le durcissement du béton à base de métakaolin avec différent pourcentage de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30% en poids. Le rapporort E/C était fixe. Les résultats de la résistance à la compression ont indiqué que 10 % de MK amenaient la résistance à la compression la plus élevée après 28 jours, suivie de 20 % et 15 %, respectivement. le développement résistance à la compression était de 0,36 %, 12,52 %, 0,59 %, 3,33 %, et 3,33 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de MK, respectivement, tandis que 30 % de MK subir une diminution de 27,36 %.

Valipour et al. **[53]** ont examiné influence de MK sur les caractéristiques du béton. Pour cette étude le MK remplacé par le ciment de 0%, jusqu'à 15% en poids avec un pas de 5%. Un rapport E/C fixe de 0,4 et divers dosages de SP ont été utilisés. Les résultats ont observé que 15% de MK donnaient. la résistance à la compression la plus élevée.

Darweesh et Nagieb **[54]** ont examiné l'incidence de l'inclusion de la bentonite calcinée dans la pâte de ciment sur l'activité pouzzolanique et ont montré une augmentation de la résistance à la compression. cette augmentation de la résistance est associée à une diminution de la porosité apparente.

B .résistance à la traction

Hong et al. **[55]** Ont réalisé une étude sur les propriétés de résistance et aspects de durabilité du béton à haute résistance à base de métakaolin. Les auteurs ont remarqué qu'il n'y a pas un effet significatif sur la résistance à la flexion avec 5%, 10% et 15%MK, tandis que l'inclusion de 20% MK a montré une légère réduction de la résistance à la traction.

Yerramala et al **[56]** ont examiné la résistance traction par flection du mortier contenant 5 % à 25 % du Mk, en poids, avec une augmentation de 5 %. La résistance à la flexion a été mesurée à différents âges de 7, 28, 90 et 180 jours. Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la flexion avec 5 %, 10 % et 15 % de MK, tandis que 20 % et 25 % de MK a montré une résistance inférieure à celle du témoin. L'inclusion de 10 % de MK présentait la teneur optimale de résistance.

Vu et al **[57]** ont surveillé la résistance à la flexion de mortiers de ciment mélangés avec MK. Ils ont constaté que la résistance à la flexion a augmenté grâce à MK.

Naik and Gupta **[58]** a remplacé le ciment dans les bétons par du MK à des taux de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 % en poids.. Les résultats ont montré une résistance à la flexion plus

élevée avec l'inclusion de MK. L'inclusion de 10 % de MK a présenté la résistance à la flexion la plus élevée. L'amélioration de la résistance à la flexion en 28 jours a été 5,96 %, 13,16 %, 8,95 % et 2,98 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de MK, respectivement.

I.3.8 Effet des argiles calcinées sur la durabilité des bétons/mortiers

A. Absorption d'eau

Signalons que khatib et al **[49]** ont fait des tests sur absorption d'eau de bétons incorporant différents taux de métakaolins. Leurs résultats montrent que le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en métakaolin.

Anhad singh et al ont, aussi, montré que l'absorption d'aux diminue avec la présence de métakaolin. D'après l'auteur plus il ya de metakaolin plus la porosité capillaire affectée et plus le coefficient d'absorption d'eau diminue.

K. Al-Jabri et al **[59]** ont formulé des mortiers avec différents pourcentages de MK 2, 4, 6, 8, 10, 12 and 14 .Les résultats ont enregistré une diminution d'environ 24% de l'absorption d'eau par rapport au mortier de référence.

Courard et al **[60]** ont étudié également le comportement des bétons avec metakaolin lors d'une immersion totale dans l'eau. Les résultats indiquaient que l'absorption d'aux tend à augmenter l'égerment avec l'augmentation de la teneur en MK. D'après l'auteur ces résultats découlent de la densification de la matrice cimentaire par les produits des réactions pozzolanique. Les hydrates formés segmentent la porosité capillaire, réduisant ainsi les capacités d'absorption d'eau du béton.

B. Porosité

Barbhuiya et al **[61]** ont examiné l'effet du métakaolin sur la porosité du béton et ont constaté une diminution de la porosité avec l'augmentation de la teneur en MK.

CONCLUSION

La principale difficulté de fabriquer de tels matériau béton est que l'on recherche à concilier des propriétés a priori contradictoires ; d'une part, une grande fluidité et déformabilité et, d'autre part, une haute stabilité afin d'obtenir finalement un matriau béton très maniable. Pour satisfaire ces exigences rhéologiques, la formulation des MAP doit renfermer une forte teneur en pâte. De plus, il est nécessaire d'ajouter, à cette formulation, au moins une addition minérale et un superplastifiant en proportions bien précises. Ajoutons, enfin, que l'utilisation des agents colloïdaux est éventuelle.

L'impact environnemental du béton en terme de CO2 peut en outre être réduit par l'utilisation de substituants. Cependant, le potentiel de substitution du ciment reste limité par rapport au volume de ciment à l'échelle mondiale. Plusieurs programme de recherche ont été lancés sur les structures et matériaux cherche à répondre aux questions posées : comment fournir un béton résistant et à faible impact environnemental tout en utilisant les ressources locales En d'autres termes, est-il possible de développer localement de nouvelles additions minérales pour le ciment.

La substitution de 5 % à 10% de ciment par argile calciné a un effet sur les propriétés mécaniques du béton. On a donc cherché à voir s'il serait possible de produire des pouzzolanes en calcinant des mélanges d'argiles largement disponibles.

Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes de formulation adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche. Dans une première partie on présentera les différents matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail tout en justifiant leurs utilités ainsi que leurs caractéristiques et différentes propriétés. Dans une seconde partie, on exposera la formulation qui a été choisie pour réaliser les différents essais de MAP.

La caractérisation MAP à base d'argile, à l'état frais et durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai. Les différents essais faits au cours de ce travail sont :

Essais réalisés sur MAP frais

- Essais d'étalement au mini cône.
- Essais d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel)

Essais réalisés sur MAP durci

- Essai de compression sur demi prisme d'éprouvette 4*4*16 cm^3 à l'âge de 3, 7, 28, 56,90 jours.
- Essai de traction par flexion sur demi prisme d'éprouvette 4*4*16 cm^3 à l'âge de 3,7,28,56,90 jours .
- Conductivité thermique
- Absorption d'eau par capillarité sur demi prisme d'éprouvette 4*4*16 cm^3à l'âge de 28 et 56 jours
- Porosité sur demi prisme d'éprouvette 4*4*16 cm^3à l'âge de 28 et 56 jours
- Resistance au feu.
- Perte de masse

II.1 Caractérisation des matériaux utilisent

Pour la confection des mortiers, des matériaux locaux sont caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil du Hall de technologie de l'université de Médéa suivant les normes en vigueur. Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité.

II.1.1 Le ciment

Il s'agit du CEM II/A El Mâtine, c'est un ciment Portland composé (produit par la cimenterie de LAFARGE) dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa,

Tableau II.1 résume l'Analyse chimique et composition hypothétique du ciment, selon sa fiche technique.

Tableau II . 1 : Analyse chimique du ciment et composition du clinker**. [62]**

Analyse chimique du ciment	**Perte au feu (%)**	**7.00-9.50**
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	**1.50-3.00**
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	**2.00-2.50**
	Teneur en oxyde de magnésium MgO(%)	**1.90-2.30**
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	**0.01-0.03**
Composition hypothétique du Clinker	**Silicates tricalciques C3S (%)**	**58.00-64.00**
	Aluminates tricalciques C3A (%)	**6.00-8.00**

- **Essais physiques**
- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme **[NF P 15-476] [63]**. Les résultats de mesure donnent :

- **Masse volumique absolue (kg/ m³) : 3150**
- **Surface spécifique Blaine (cm²/g) : 3020**

II.1.2 Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable roulé provient de carrière de Oued-Souf, située à 600 km au SUD-EST d'Alger, sa classe granulaire est 0/3.

La Figure suivante donne un aperçu sur la nature du sable utilisé ses les propriétés physiques sont représentées dans le **Tableau II.2.**

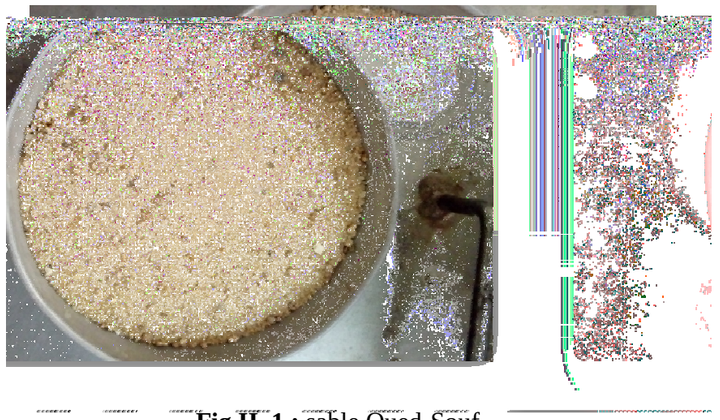


Fig II. 1 : sable Oued-Souf

II.2.2.1 Analyse granulométrique du sable utilisé

L'analyse granulométrique du sable utilisé est présentée sur **la Fig.II.2** suivante :

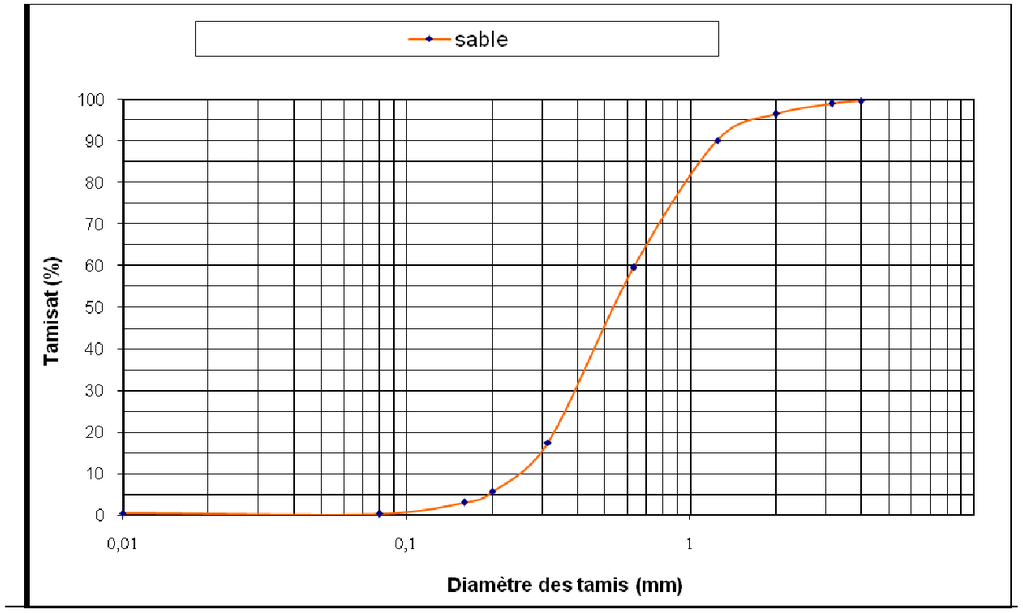


Fig- II.2 : Courbe granulométrique de sable

Tableau II . 2 : Propriétés physiques de sable utilisé

Caractéristique	Type de sable	Normes
Provenance	Sable d'oued-souf	
Classe granulaire	0 /3	NF EN 933-1[74]
Module de finesse	2.02	
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.64	NF EN 1097-6[75]
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.58	NF EN 1097-3[76]
La compacité(%)	60	NF EN 1097-3[76]
La porosité (%)	40	NF EN 1097-3[76]
Equivalent de sable (%) à vue	88.0	NF EN 1097-8[77]
Equivalent de sable (%) à piston	82.11	
Taux d'absorption d'eau (%)	0.44	NF EN 1097-6[76]

II.1.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication du béton autoplaçant est celle de distribution considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme **[NF EN 1008**] **[64]**.

II.1.4. Adjuvant

Pour assurer une ouvrabilité satisfaisante, on a employé un Superplastifiant Haut réducteur d'eau à base de polycarboxylate d'éther formulé à base de polymère de synthèse combiné commercialisé par la société Granitexe, sous le nom **« MEDAFLOW 145 ». (Annexe B).**

Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,3 à 2 % du poids du ciment, ces caractéristiques sont :



Fig II. 3 Superplastifiant MEDAFLOW 145.

Ses caractéristiques sont :

- Aspect ……..liquide
- Couleur …….brai clair
- PH……..5-6
- Densité……1.065 ± .015
- Teneur en chlore……..< 1g/l
- Extrait sec ……. 30 ± 1.5%

II.1.5 Les Ajout (Argile)

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'effet de l'argile sur les propriétés de mortier autoplaçant. Deux types d'argile ont été étudiés sous forme de poudre qui remplace des fractions (5 %, 10%, 15% et 20%) de volume du ciment. Ces deux types sont disponibles dans la willaya de Médéa ; le première à été apporté de la région **d'Ouezra** , et la deuxième type à été extrait de la région de **AL Galb kbir** .

❖ Préparation de l'argile étudiée :

La préparation de l'argile passe par trois étapes essentielles :

1- Séchage : cette étape s'est faite en faisant passer dans une étuve chauffée à110°C l'argile 2 heures.

2- Cuisson de l'argile (calcination) : l'objectif de la calcination est de rendre pouzzolanique des matériaux peu réactif par déshydroxylation .l'argile crue broyé est cuit dans un moule en fente sous température introduit dans un four électrique à 900°C pendant 2h .

3- Broyage d'argile : le broyage de l'argile a été mené jusqu'à avoir une finesse de 4000 (g/cm^3).

Les différentes étapes de préparation ainsi que les formes des argiles avant et après ces étapes sont présenté dans la **Fig (II.2) (II.5)**

La finesse des argiles a été fixée à 4000 g/cm^2, les masses volumiques de deux types sont :

Argile rouge (AR) : 2.63g/ cm^3
Argile beige (AB) : 2.79g/ cm^3

Préparation de l'argile étudiée

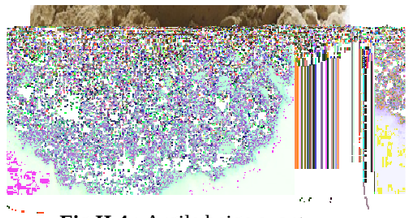


Fig II.4 : Argile beige avant la calcination



Fig II.5 : Argile verte avant la calcination



Fig II.6 : Le Four de calcination

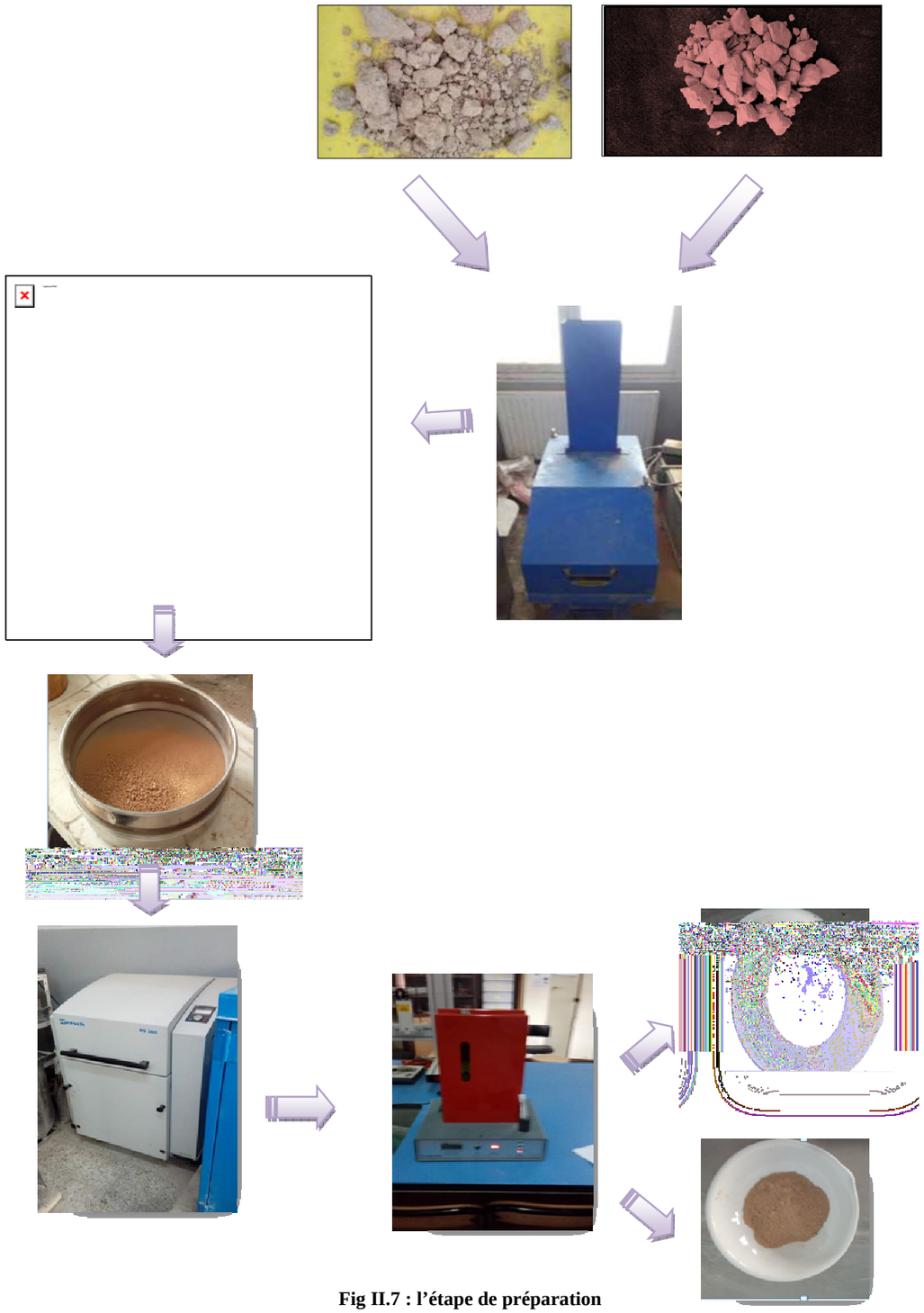


Fig II.7 : l'étape de préparation

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux du gâchée, afin d'obtenir MAP avec des propriétés souhaitées. Notre étude est focalisée sur l'influence des argiles sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un mortier autoplaçant.

Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, argiles, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la méthode de formulation théorique **SABLOCRETE 1994[65]**. , en assurant un rapport **E/C= 0.38** et le dosage de superplastifiant variable pour assurer une ouvrabilité constant et **S/M.**

- **MAP à base des argiles calcinée**

Avec les deux types d'argile nous avonspréparé 8 séries de MAP la différence entre eux réside dans le volume de substitution du ciment par argile, où nous avons fixé 4 proportions ; 5, 10,15 et 20%. Pour éclaircir l'effet de l'argile, les 8 séries sont comparés avec un mortier de référence sans argile. Le détail de formulation est présenté dans le tableau qui suit :

	Substitution (%)	Ciment (g)	Sable (g)	E/C	Eau (g)	Argile(g)	SP %	SP g
MAPTM	0	680	1320	0.37	251.6	0	1.3	8.84
MAPAR	5	646				28.38	1.4	9.04
	10	612				56.47	1.4	8.57
	15	578				85.16	1.4	8.09
	20	544				113.54	1.4	7.62
MAPAB	5	646	1320	0.37	251.6	30.11	1.5	10.20
	10	612				60.22	1.6	10.88
	15	578				90.34	1.6	10.88
	20	544				120.45	1.7	11.56

II.3. Séquence de malaxage du MAP

La séquence de malaxage décrite dans la figure II.12 suit les étapes suivantes :

- Malaxer à sec le ciment, sable, filler marbre et déchet afin d'homogénéiser le
- mélange pendant 30 secondes (on a utilisé un malaxeur de capacité de 5 litres).
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (w1 = 60% Eau).
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (w2 = 40% Eau) mélangé avec le superplastifiant.
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.
- En laisse le mélange reposé 3 minutes
- Malaxer le mélange pendant 1 :30 minutes

La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du béton de sable autoplaçant. Pour assurer une meilleure incorporation, et d'après la séquence de malaxage de ce produit cité en fiche technique, l'ajout de déchet de marbre et déchet de verre qui est doit être mélangé avec les agrégats (ciment, sable) cette quantité a été prise d'un pourcentage massique du sable et ajouté d'un seul coup.

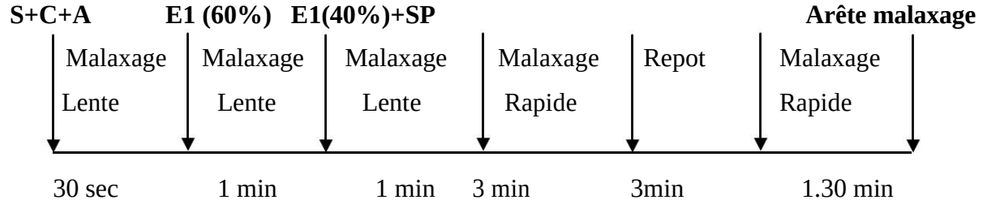


Fig- II. 8 : Séquence de malaxage autoplaçant.

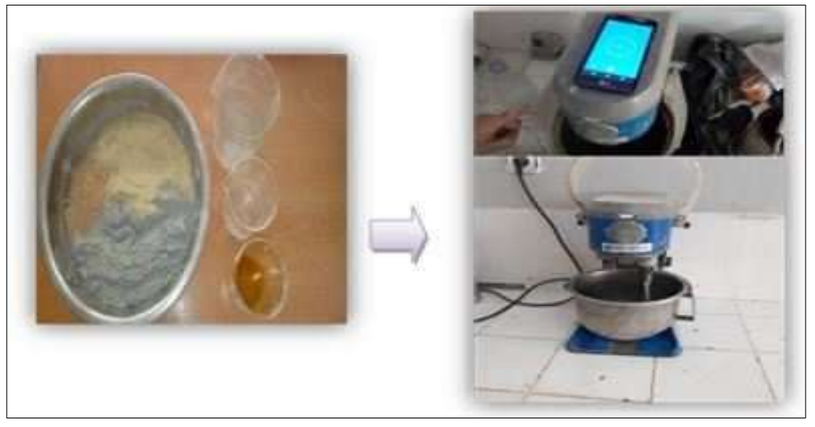


Fig- II.9 : protocole de malaxage.

II.4. Essais sur MAP

II.4.1-Etat frais

Dans cette étude, deux essais ont été effectués pour valider le caractère MAP formulés selon les recommandations de l'AFGC.

a) Essais d'étalement au mini-cône :

Selon la norme **NF EN 12350-8 [66]** l'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre d'étalement du **MAPA** est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenue. La fig II.10 montre de l'essai d'étalement au mini cône.



Fig- II.10 : Mesure l'etalement de mortier autoplacent

b) Essai d'écoulement à entonnoir en V (V-funnel) :

Selon la norme **NF EN 12350-9 [67]** L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui impose entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de mortier et le temps pour lequel le mortier prend pour couler à travers le dispositif est mesure. Ce temps mesure indique la fluidité et Caractérise la capacité du mortier à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif. La figure montre de l'essai. **(Fig II.9)**



Fig- II. 11 : protocoles de l’essai d’entonnoir (V- funnel).

- **Préparation et conservation de l’éprouvette :**

Les différents types de mortier autoplacent sont tous fabriqués dans laboratoire. Le mortier a été coulé dans des moules métalliques de forme prismatiques 4x4x16 cm^3 destinées aux essais de : compression, traction, absorption, porosité et conductivité thermique ainsi que la résistance aux feux. D’autres éprouvettes ont été préparées de forme cylindrique de 10 cm d’épaisseur et 10cm de hauteur destinées aux mesures de diffusion des ions de chlorure. Ainsi que essais thermiques conformément à la norme **NF EN 12390-2-2001 [68]**.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d’éviter le risque d’évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et exposé à l’aire

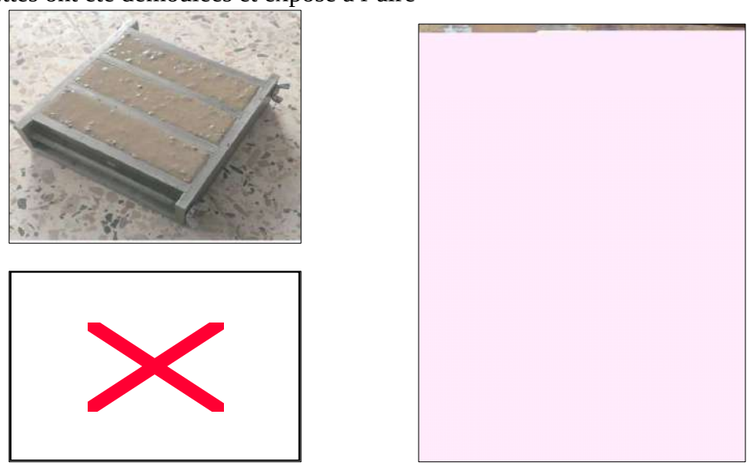


Fig- II. 12 : Fabrication des éprouvettes.

II.4.2 Etat durci

a) Essais de compression et traction par flexion

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme **[NF EN 196-1][74]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à 3,7, 28, 56,90 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN conforme à la norme **[NF P 18-412] [69] (Fig. II.17)**

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la **Fig. II.17.**



Fig- II-13 : Dispositif de mesure de la résistance à la compression et traction par flexion

b) Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure, on prend un morceau d'éprouvette de Mortier déjà sécher et on le pesé (m0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau **(Fig.II.19),** pendant chaque intervalle de temps (12 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), la différence de poids c'est le poids de l'eau absorbé (mi- m0) **[NE 13057] [70].**

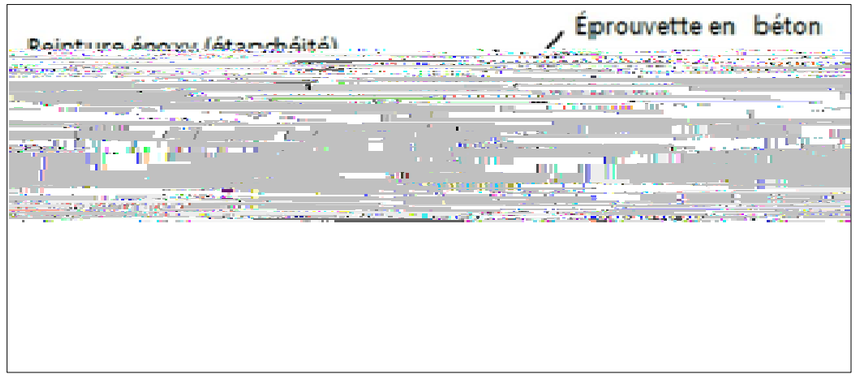


Fig.II.14 : Principe d'essai d'absorption d'eau par capillarité.



Fig II.15: Essai d'absorption d'eau par succion capillaire de MAP

c) Porosité :

Les échantillons sont séchés dans une étuve ventilée à 105 °C durant 2 heures,puis pesés pour déterminer la masse de chaque échantillon sec,puispassé ensuite à imbibition sous vide pendant 4 heures; ensuite ont les prolongés dans l'eau jusqu'à saturationet pesés une notre fois avec deux manière ; une à la sortie d'eau (M_{air})et une autre dans l'eau pour (M_{eau}).

La porosité volumique accessible à l'eau ε exprimée en pourcentage, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{Mair - Msec}{Mair - Meau} \times 100$$

ε (%) : La porosité totale.

Mair : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air.

Msec: La masse d'éprouvette sèche.

Meau: La masse d'éprouvette immergée dans l'eau. [M rahmoune].

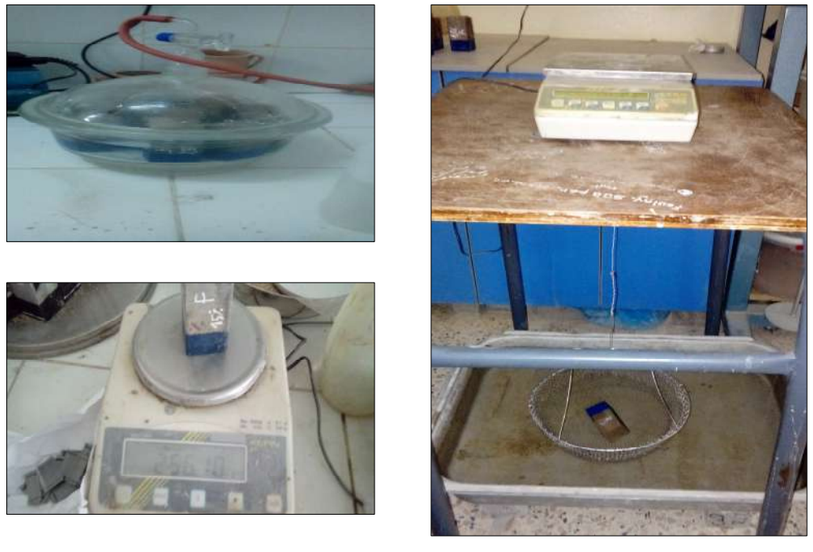


Fig -II.16 : Mesure de la porosité accessible à l'eau

c) Conductivité thermique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesurés à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme **ISO 8497-1 [71].**

- **Le CT METRE Norme de référence NF EN 993-15 [72]**

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induit

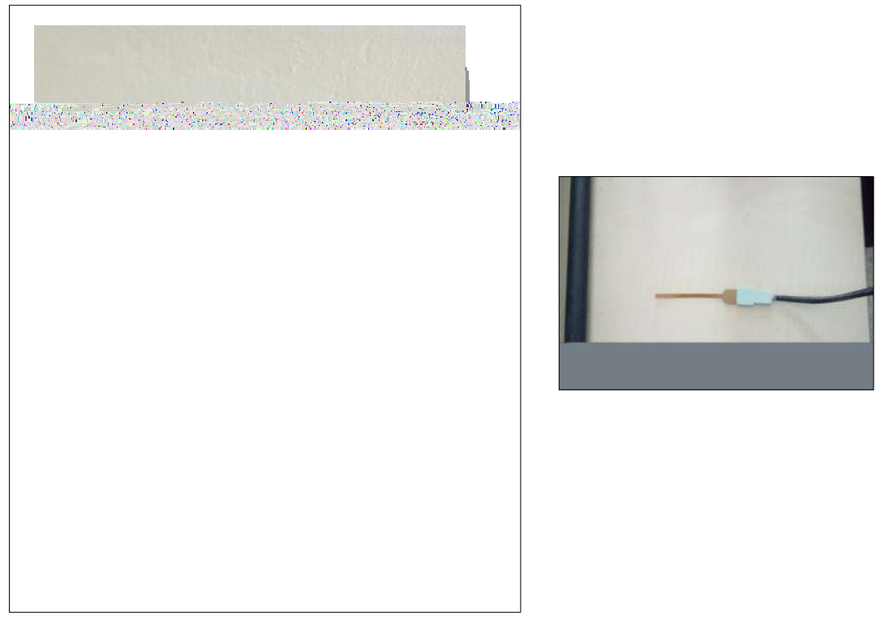


Fig - II.17 : Le CT METRE

e) Resistance au feu

L'essai consiste a séchés les éprouvette prismatiques à 105°C pendant 2 heures en suit elles sont chauffée dans un four à moufle à différent température ; la série 1 à température 200 °C, le deuxième à 400°C, et la troisième à 600°C, avec une vitesse de chauffage égale à 10°C /min maintenues la température constant dans le four pendant une heure conformément à la norme **ISO 834.**

Toutes les éprouvette sont ensuit refroidis a l'aire(en dehors du four) pendant 24 heure puis passées à l'essai de compression pour déterminer la nouvelle résistance en compression. Pour chaque température, des mesures de pertes en masse ont été effectuées. Le degré de déshydratation (perte de masse(٪)) est évalué par la relation suivant :

[Perte de masse (٪)]=[M1-M2/ M1]

Avec

M1, M2 : les des éprouvette avant et après le chauffage respectivement



Fig -II.18 : Essai résistance au fau de MAP

f) **Diffraction des rayons X (DRX)**

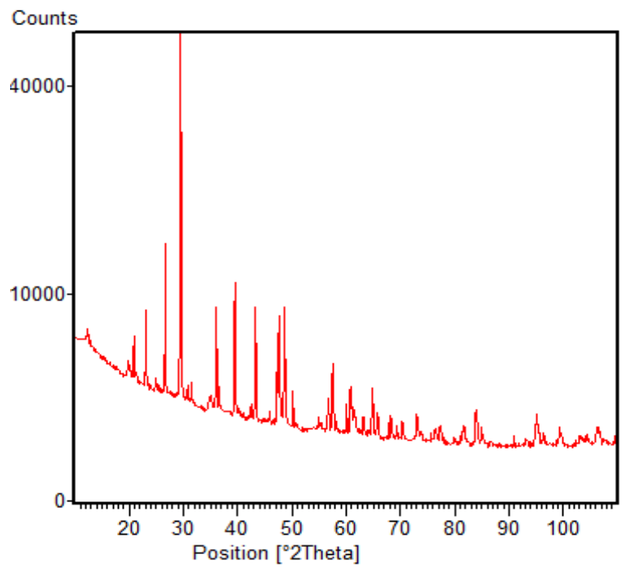
- **Théorie de la diffraction des rayons X**

La diffraction des rayons X est une technique puissante pour l'étude des cristaux à l'état solide. Elle permet d'accéder à leur structure cristalline. Elle est indispensable à l'identification les minéraux argileux des argiles naturelles ainsi que les minéraux (« impuretés ») associés. Le principe de cette technique est basé sur la diffusion des rayons X par la matière. Ce phénomène de diffusion est le résultat d'une interaction entre le faisceau de rayons X et la matière. La propriété cristalline de cette dernière exige des directions privilégiées au faisceau de rayons X incident **[73].**

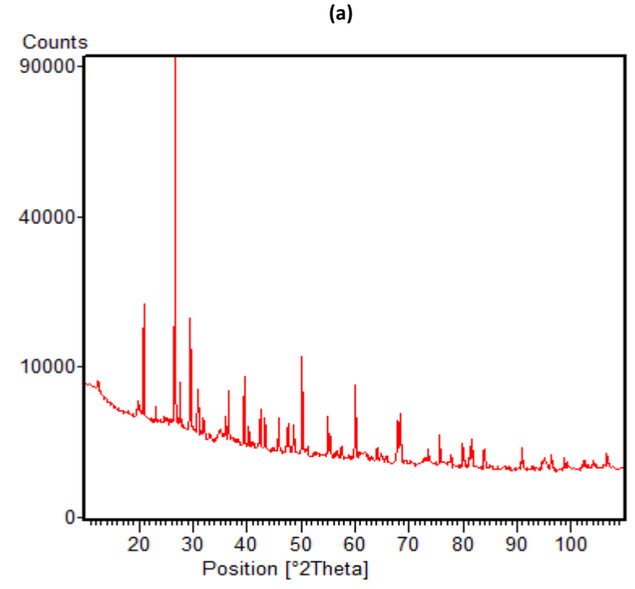


Fig-II-19: Diffractomètre de Rayons X modèle Phillips Xpert-pro

Les résultats de cet essai sont présenté par les spectres de diffraction schématisés dans la Fig II.20 (a-b)



(a)



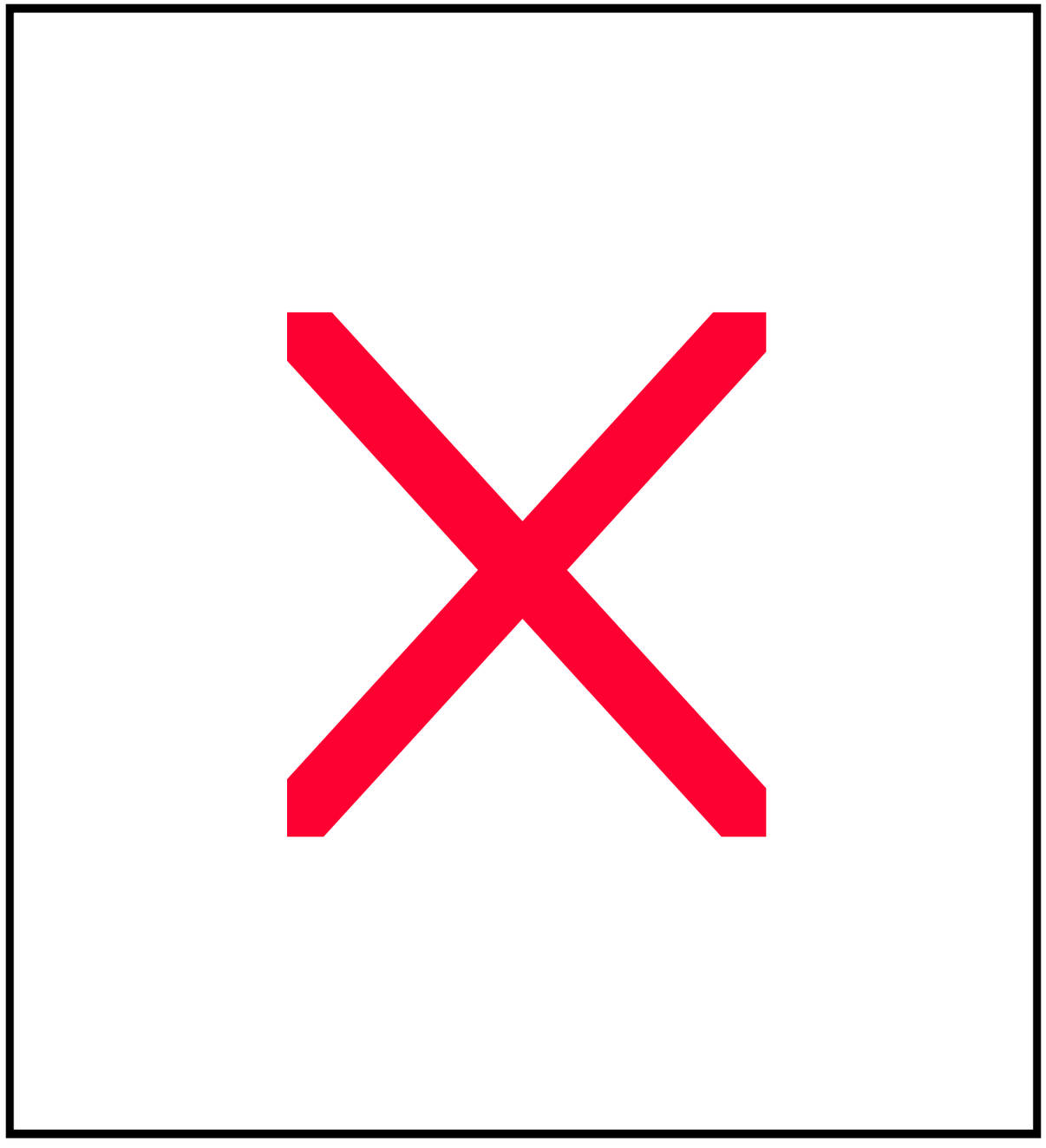
(b)

Fig II .20 : spectre de diffraction de rayon X de deux argile ; a – rouge, b- beige

Les résultats montrent que les deux argiles de type quartzite argile beige contient 99 % de silice « SiO_2 » et l'argile rouge contient 73 % de silice.

II.5 VARIABLE ETUDIES

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumées dans la figure suivante :



CONCLUSION

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le nature algérien tels que le ciment, le sable, les superplastifiants) ainsi que les défirent type de l'argile Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur le mortier.

Pour déterminer leurs caractéristiques rhéologiques (essais d'étalement au mini cône, d'écoulement à l'entonnoir (V-funnel),). Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique et physique (compression, traction par flexion, absorption d'eau, porosité, conductivité thermique, et résistance au feu).

Pour détermine, l'influence des argiles sur le mortier autoplacent soit à l'état frais ou l'état durci.

INTRODUCTION

L'étude expérimentale a pour objectif principal d'étudier l'influence de la poudre sur le comportement du mortier autoplaçant à l'état frais et durci. Pour cela, deux facteurs ont été fixé ; le type d'argile et le taux de substitution de ciment par la poudre d'argile.

Les caractéristiques du MAP étudiées sont :

Etat frai : étalement et le temps d'écoulement

Etat durci : résistances à la compression et à la traction testées à 4 âges, l'absorption, la porosité, pertes en masse, conductivité thermique et la résistance au feu.

III.1. ÉTAT FRAIS

Pour obtenir un MAP à base de poudre d'argile tout en assurant la fluidité et la capacité de passage recommandée par EFNARC [36], les différents mélanges sont soumis à l'essai d'étalement au mini-cône et le temps d'écoulement par l'essai V-Funnel. Les résultats acceptés doivent être comprises entre 270 - 300 mm et 4 - 10 s respectivement.

Les résultats des essais d'étalement et le temps d'écoulement réalisés sur les deux séries de MAP (MAB, MAR) sont présentés dans les Figures 3.1 et 3.2 respectivement. Pour chaque série de mortier (MAPAB, MAPAR), il semble que l'influence du taux de substitution sur l'étalement est le même que sur le temps d'écoulement (même tendance). Ce qui implique que les résultats de l'écoulement approuvent ceux de l'essai de temps d'écoulement. Cette constatation est valable pour chaque série. Les deux types d'argiles n'ont pas même influence sur l'ouvrabilité bien qu'on a fixé même finesse, cela est dû à la différence de propriétés de deux types. L'argile beige demande une quantité élevée de SP pour atteindre la plage d'ouvrabilité souhaité, plus le taux de substitution augmente, plus le dosage en SP augmente. Contrairement au deuxième type (argile rouge), le Dosage en SP réellement diminué, la diminution d'ouvrabilité est due d'une part à l'augmentation de la quantité de la poudre d'argile qui a une finesse plus élevé à celle de ciment, et d'autre part à la diminution de la quantité de SP. Ce type n'a pas d'influence négative sur l'ouvrabilité.

Les résultats obtenus sur les MAPAB concordent avec les résultats de Madandoust et Mousavi [36]qui ont observé que le temps d'écoulement des BAP augmente avec l'augmentation de la quantité de l'argile type Métakaoulin (MK), ce dernier necéssite un dosage en SP plus élevée.

Khatib [44] montre aussi quele remplaçment partielle du ciment dans les mélanges de béton par le MK diminuer l'ouvrabilité du béton avec l'inclusion de MK. La réduction de l'ouvrabilité augmente avec l'augmentation du contenu MK.

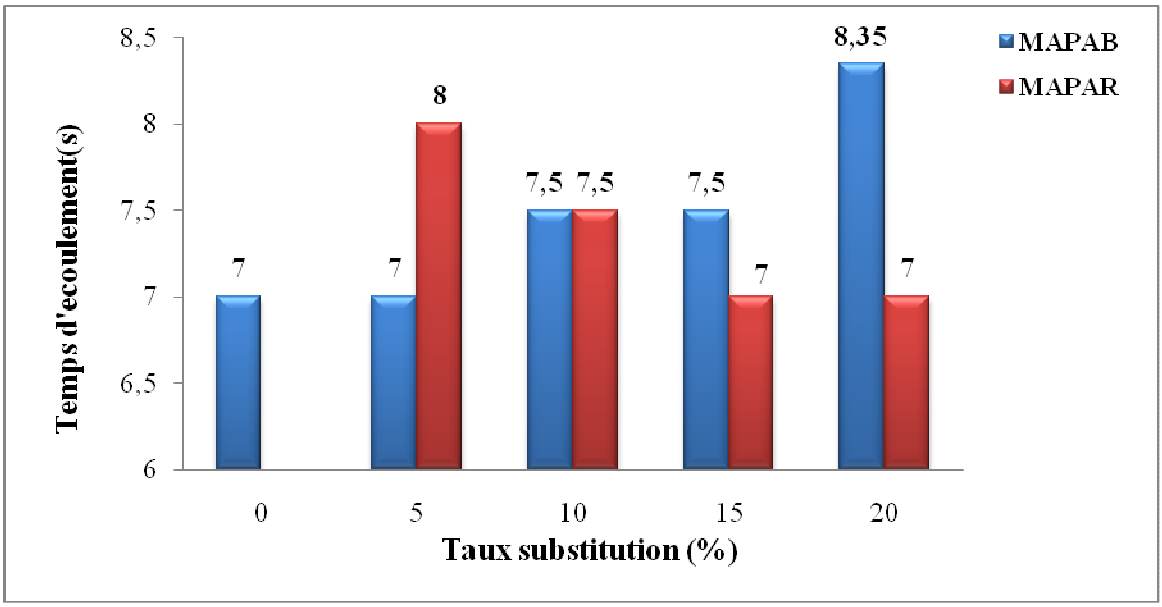


Fig III . 1 : Temps d'écoulement de différents MAP.

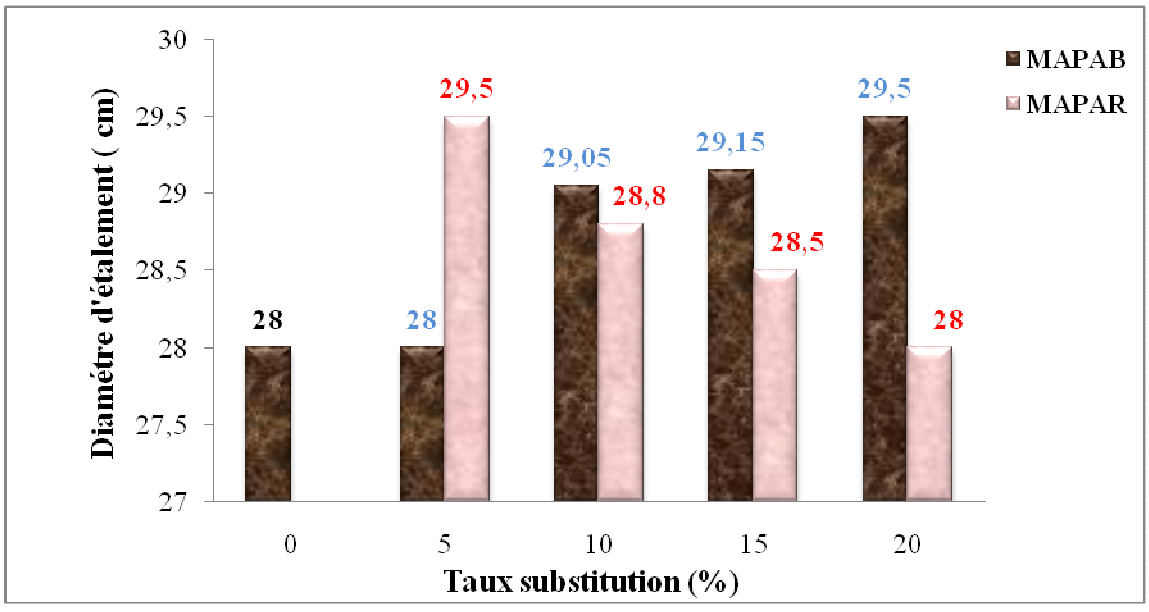


Fig III. 2 : Temps d'écoulement de différents MAP.

III.2 ÉTAT DURCI :

III.2.1. Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression des différents MAP en fonction de l'âge et le pourcentage de substitution en poudre d'argile calciné sont présentés dans les Figures 3.3 et 3.4 respectivement.

La comparaison entre les différents MAP préparés montre le remplacement de 10% de ciment par argile Beige améliore les résistances en compression à court et à long terme, cette amélioration atteint19.92 %,3.45 %,et 8.01 % ,7.43% à 7, 28 et 56 et 90jours respectivement.

Avec un volume de remplacement 15% nous remarquons une amélioration de la résistance à court terme (3, 7 jours) et avec 20% de substitution les résistances sont presque semblable à celles de mortier témoin.

la substitution du ciment par argile rouge provoque aussi une amélioration de la résistance en compression à long terme (28, 56 et 90 jours) lorsque le volume de remplacement dépasse 10%. Avec un taux de substitution de 15 % la résistance augmente de -11.39%, 3.84 % 3.29 et % à 28, 56 et 90 jours respectivement.

cela implique que l'ârgile rouge a un effet positif a long terme.

Ce résultat sont en accord avec ceux de Khatib[52] qui a examinéles résistances des bétons à base de métakaolin avec différents pourcentage de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 30% en poids. ses résultats de la résistance à la compression ont indiqué que avec 10 % de MK la résistance à la compression la plus élevée a été obtenue après 28 jours, le développement résistance à la compression était de 0,36 %, 12,52 %, 0,59 %, 3,33 %, et 3,33 % avec l'inclusion de 5 %, 10 %, 15 % et 20 % de MK, respectivement, tandis que 30 % de MK subi une diminution de 27,36 %.

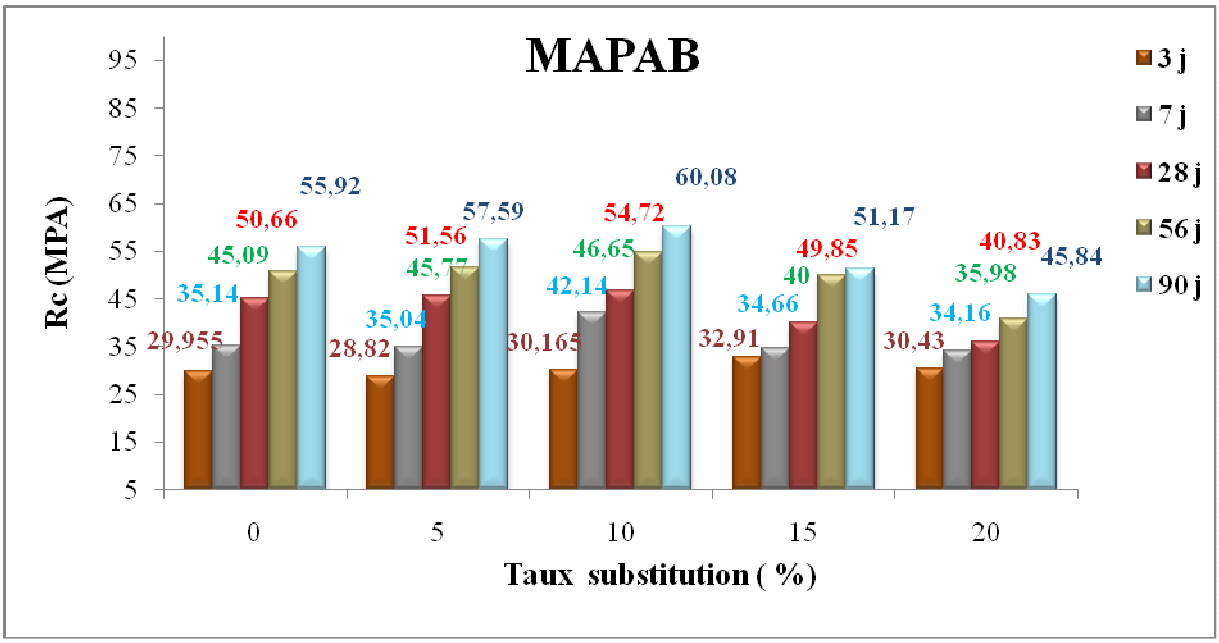


Fig III . 3 : Développement des Résistances à la compression des MAPAB en fonction du taux de substitutions en argile Beige

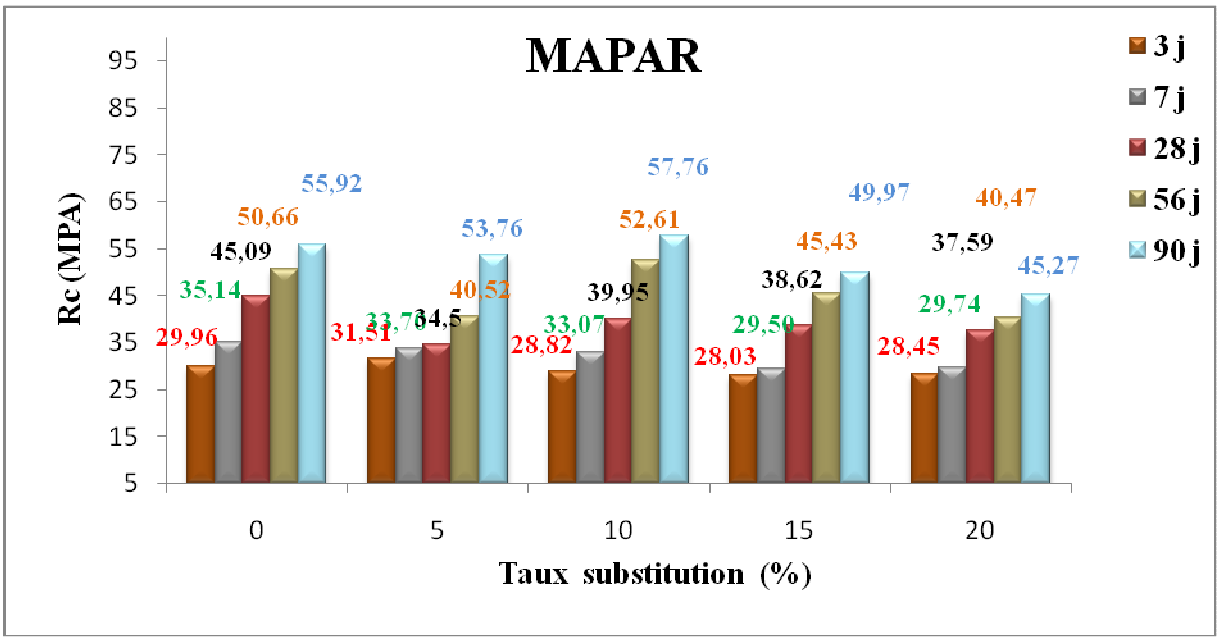


Fig III.4 : Développement des Résistances à la compression des MAPAR en fonction du taux de substitutions en argile rouge

III.2.2. La résistance à la traction

Les résultats des essais de traction par flexion sont groupés dans les figures III.5.et III.6

Un effet positif remarquable de deux argiles est observé sur les résistances à la traction des deux séries de MAP (MAB et MAR). Le remplacement de 10% de ciment par argile Beige conduit à une augmentation de résistance d'environs 1.43 %, 7.85 % 11.97 et % à l'âge de 28, 56, et 90 jours.Alors qu'avec le même taux de substitution en argile rouge les résistances augmentent de -5.92 %, -38.94 % et %. Contrairement, aux jeunes âges (3 et 7 jours) l'incorporation de l'argile diminue la résistance à la traction.

Le volume de l'argile beige qui peut remplacer le ciment ne doit pas passer 15 %, alors qu'avec l'argile rouge on peut aller jusqu'à 20% sans réduction notable de la résistance à la traction.

Vu et al[58] ont surveillé la résistance à la flexion de mortiers de ciment mélangés avec MK. Ils ont constaté que la résistance à la flexion a augmenté grâce à MK.

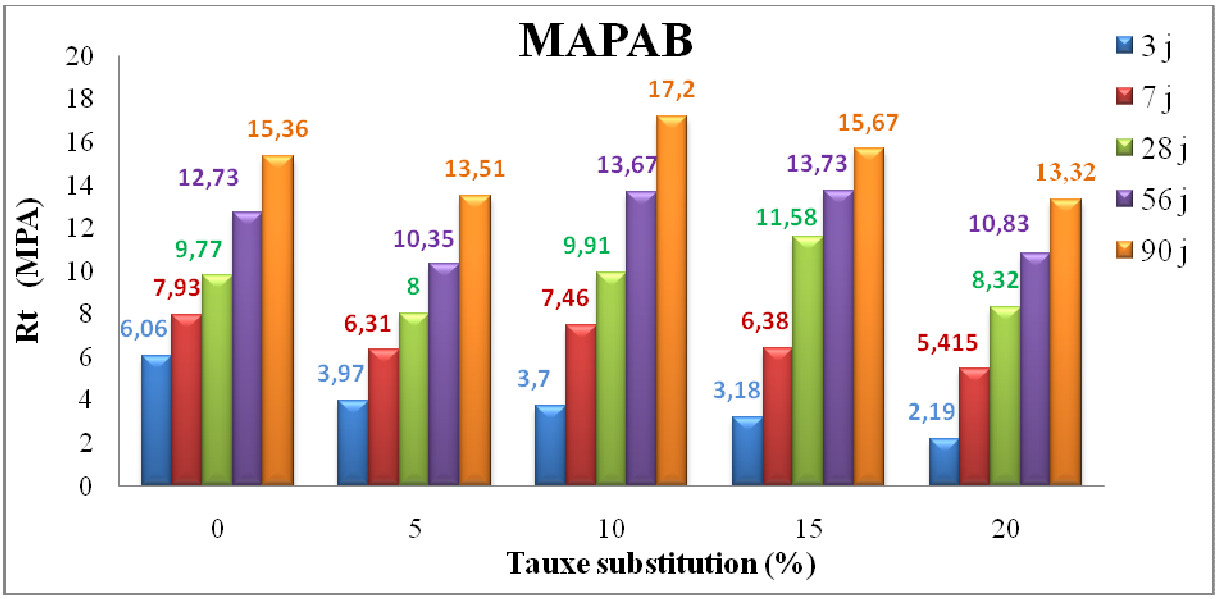


Fig III.5 : Développement des Résistances à la traction par flexion des MAPAB en fonction du taux de substitutions en argile Beige

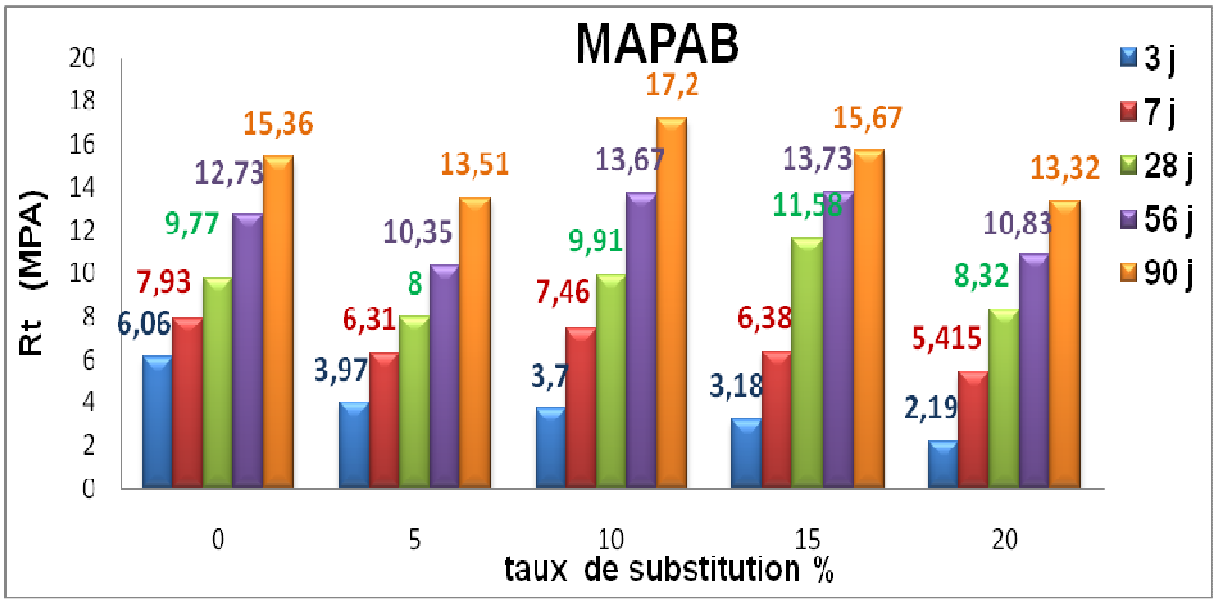


Fig III.6 : Développement des Résistances à la traction par flexion des MAPAR en fonction du taux de substitutions en argile rouge.

III.2.3. Perte en masse :

Les résultats de la perte en masse de deux séries de mortiers sont illustrés dans les figures 3.7 et 3.8. Il est a noté que ses résultats sont obtenues sous humidité et température variable.

La comparaison des résultats de deux figures montre la différence du comportement des MAP de deux séries. Sur les MAPAR, le développement de la perte en masse est rapide où les mortiers perdent les grandes quantités d'eau dans les premières 7 jours(presque 80%),alors que sur la deuxième série on observe une variation lente de la masse d'eau perdue dans le temps.Pour la série MAPAR, la plus faible perte est enregistrée sur le MAP-20%, tandis que pour la deuxième série (MAPAB), la faible valeur est enregistrée sur le MAP-10%.

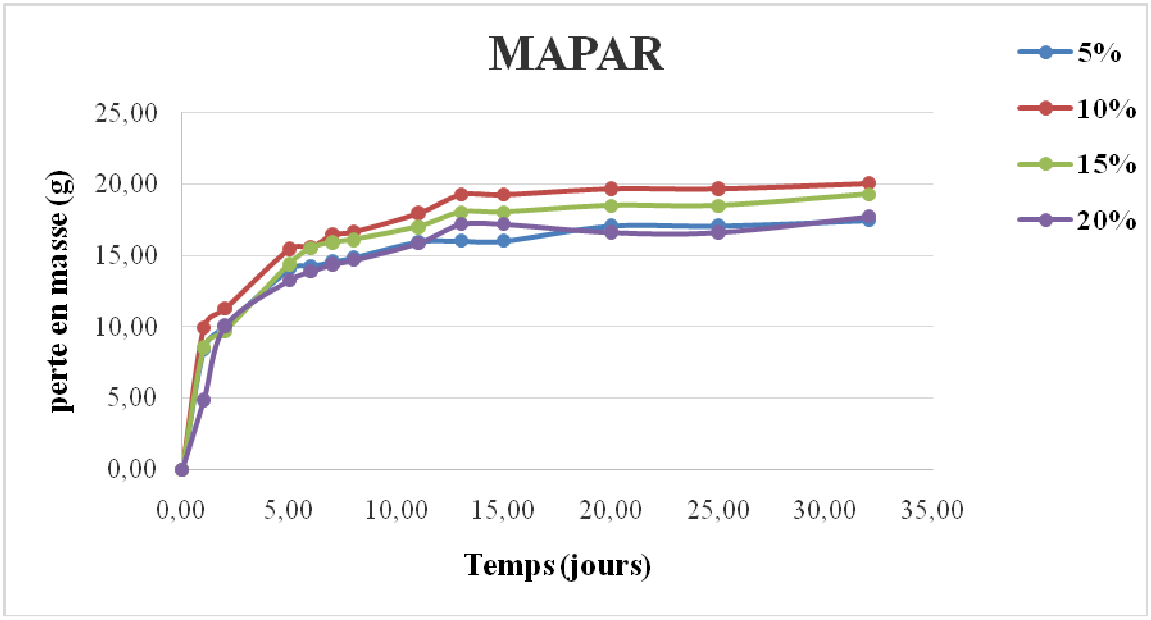


Fig III.7 : Variations de la perte en masse de MAPAR dans le temps (jours)

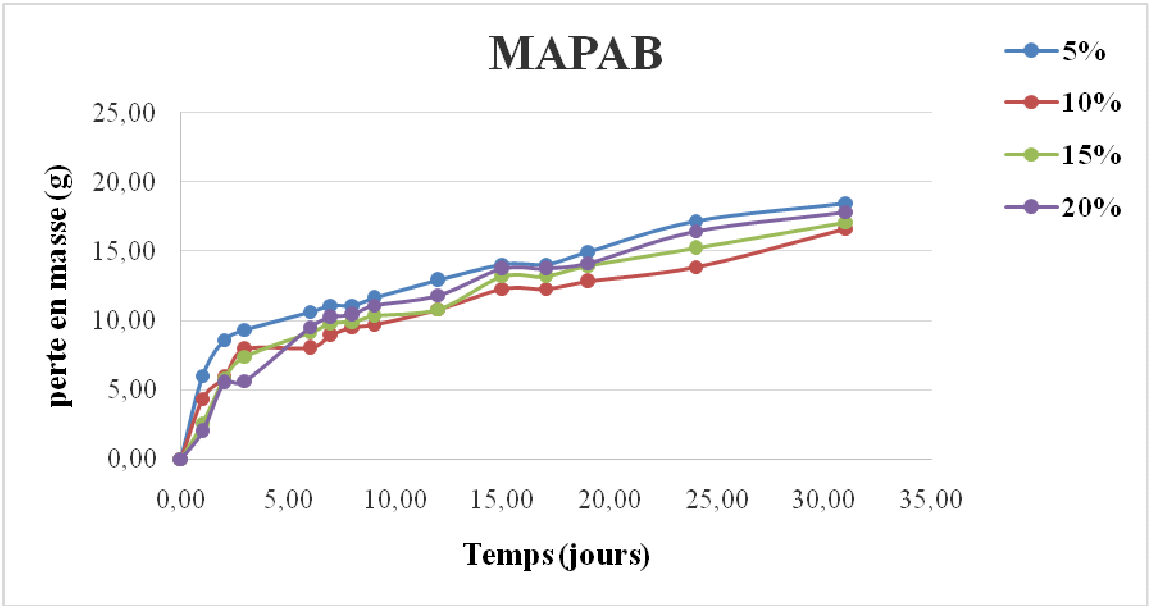


Fig III.8 : Varaiation de la perte en masse de MAPAB dans le temps (jours)

III.2.4. Absorption d'eau par capillarité :

Les essais d'absorption d'eau par capillarité ont été effectués à deux âges (28 et 56 jours), et les résultats sont présentés sous deux manières ; une sous forme de courbe qui exprimes la variation d'absorption d'eau dans le temps, et la deuxième par des histogrammes qui regroupes les coefficients de sportivité. Les résultats sont présentés dans les huit figures 9.10.12.13 en fonction de l'âge de MAP, taux de substitution et le type d'argile.

Pour chaque série de MAP ; le taux d'absorption diminue avec l'augmentation de l'âge de mortier, et augmente avec l'augmentation de la quantité d'argile. Cette observation est attendue, car l'absorption est une des caractéristiques principale de l'argile.

Les résultats de calcul de coefficient de sportivité de chaque mortier présentés dans les figures III.11 et III.14 approuve cette constatation

Khatib et al [57] ont fait des tests sur l'absorption d'eau de bétons incorporant différents taux de métakaolins. Leurs résultats montrent que le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en métakaolin.

La comparaison des résultats de deux séries, montre qu'à 28 jours l'absorption de MAPAR est presque deux fois celle de la série MAPAB. Par contre à 56 jours, nous observons une convergence.

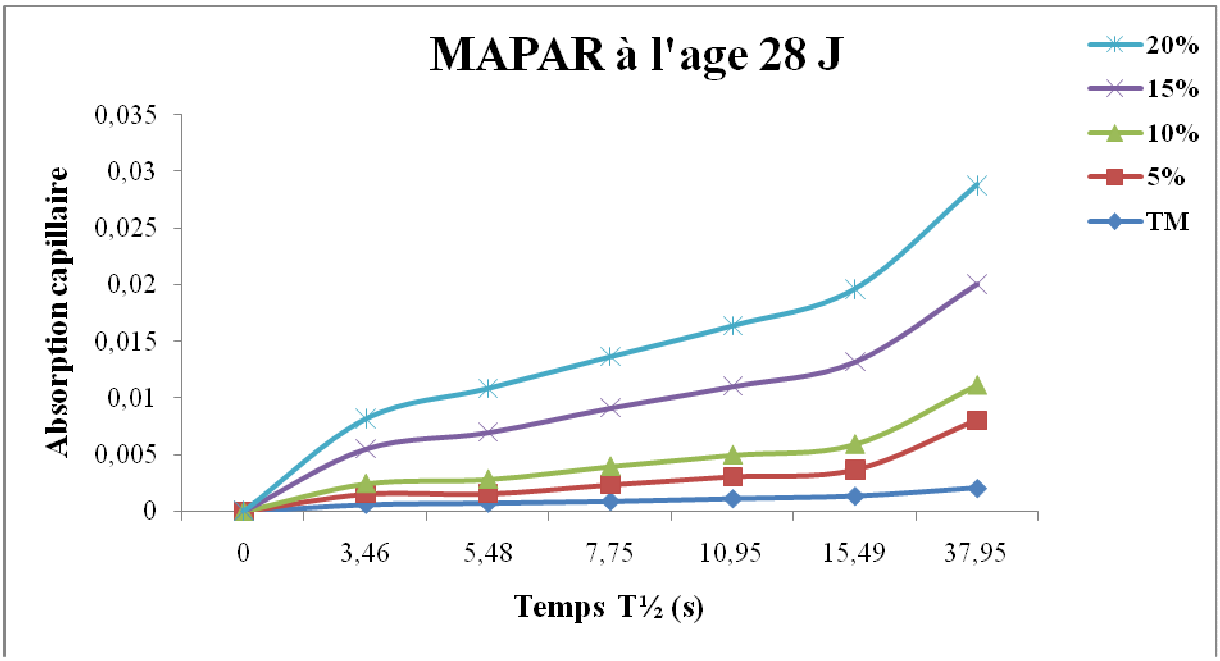


Fig III.9 : Absorption capillaire des MARAR

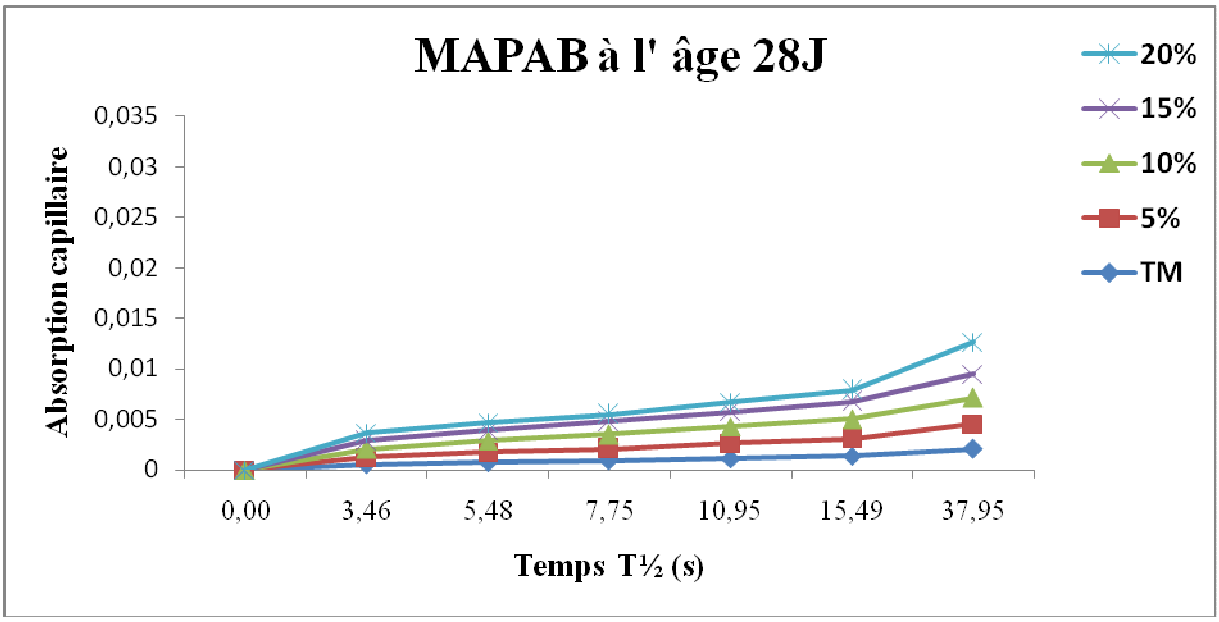


Fig III.10: Absorption capillaire des MAPAB

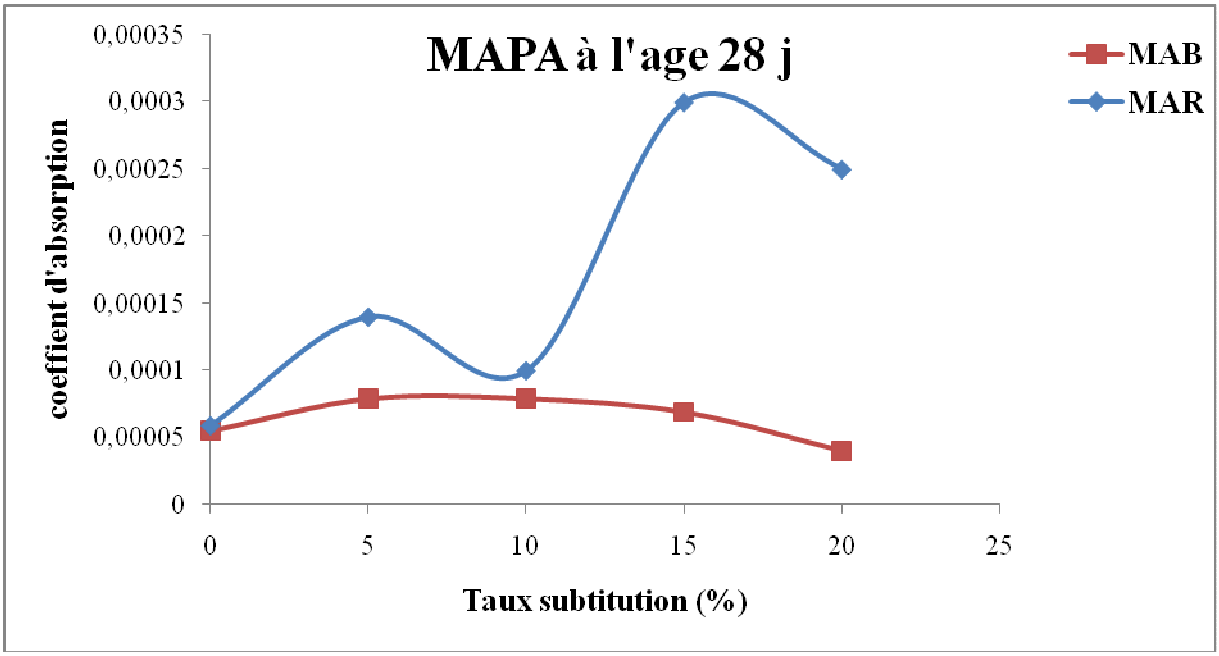


Fig III.11 : Coefficient d'absorption capillaire des MAPAR à l' âge 28 J

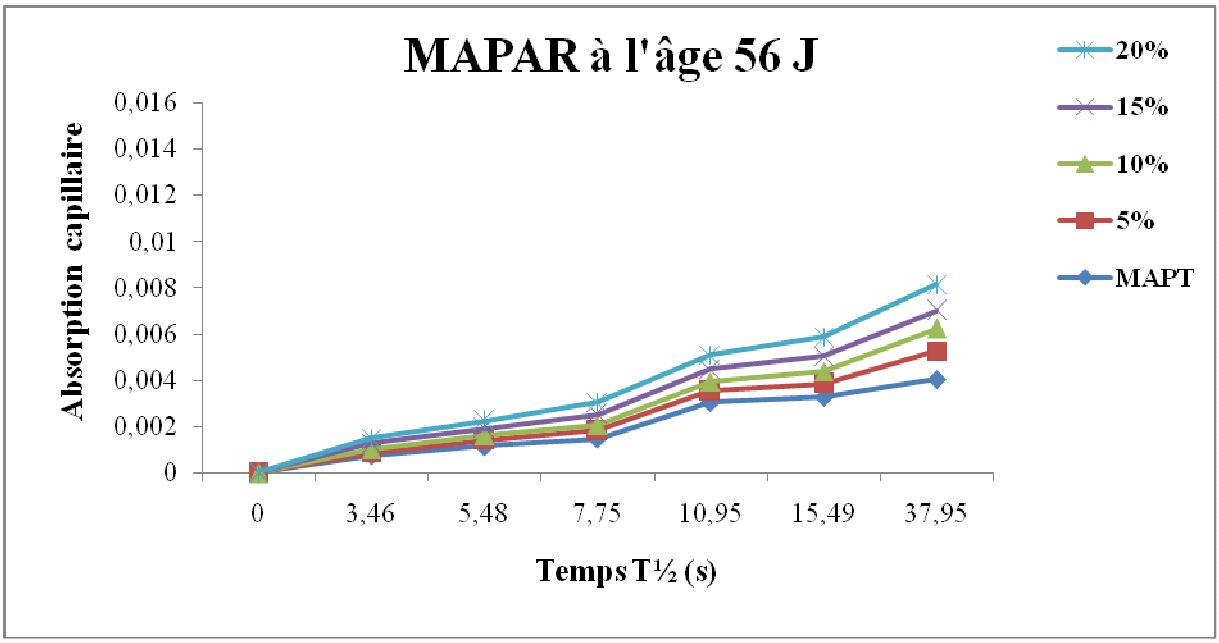


Fig III.12 : Absorption capillaire des MAPAR à l'âge 56 j

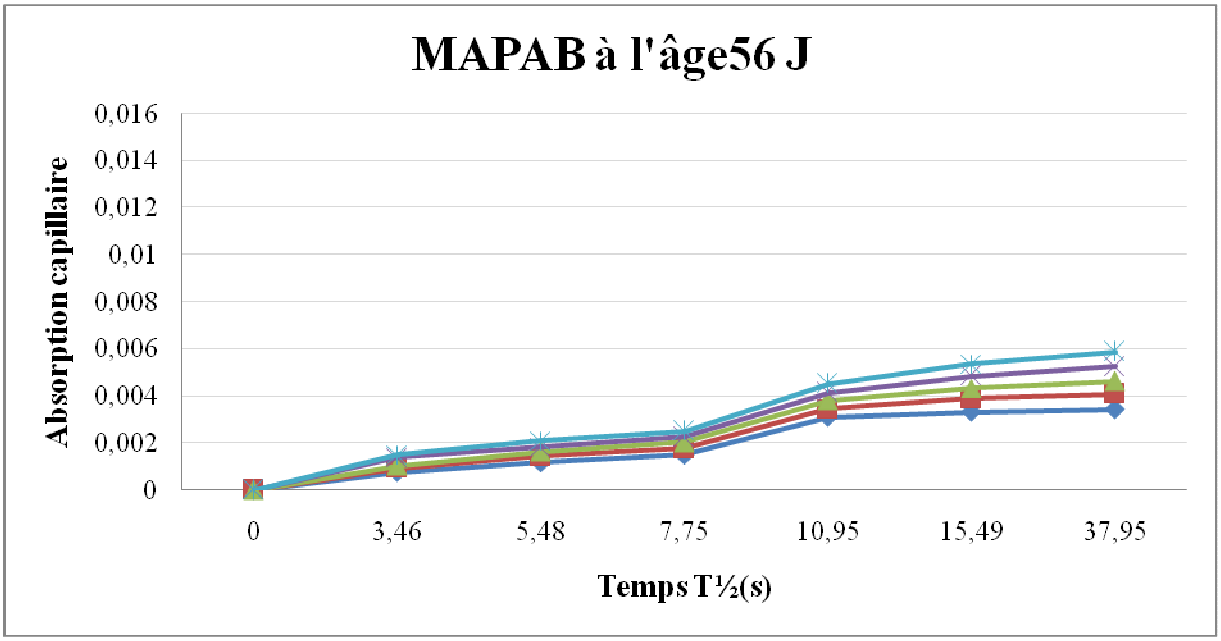


Fig III.13 : Absorption capillaire des MAPAR à l' Age 56 j

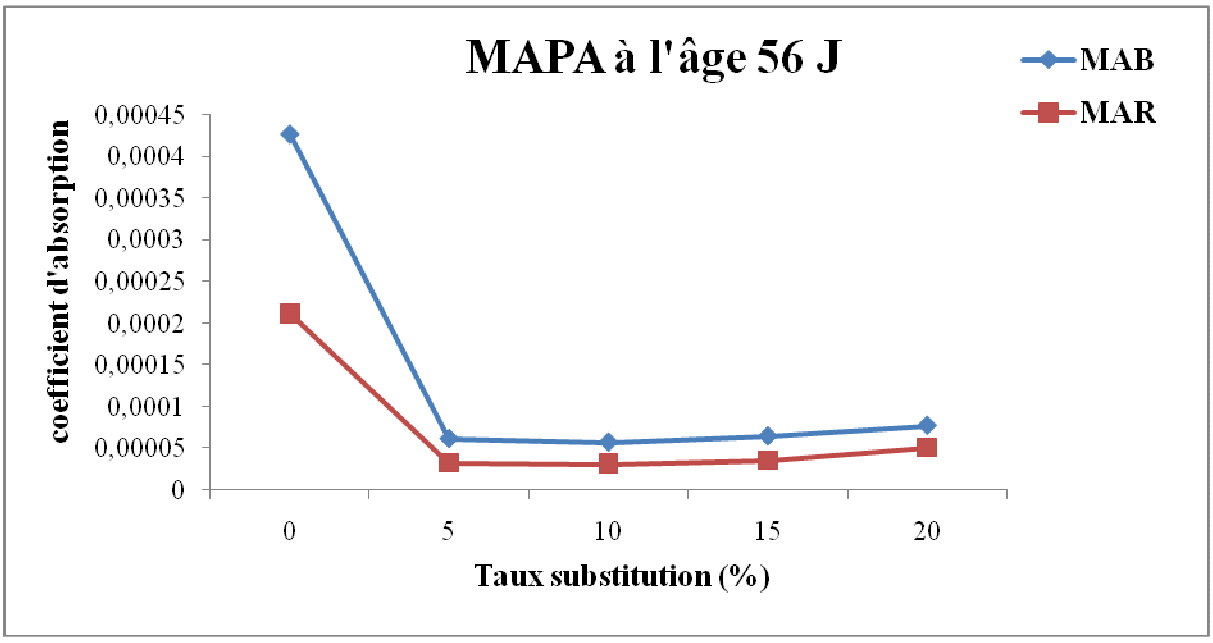


Fig III.14 : Coefficient d'absorption capillaire des MAP à l'âge56 jours

III.2.5 La porosité

Les figures 3.15 et 3.16 illustrent les résultats de la porosité des différents MAP étudiés en fonction du pourcentage de l'argile.

Il peut être clairement indiqué qu'à l'âge de 28 jours, l'augmentation du pourcentage de l'argile engendre :

- Une diminution de la porosité des MAR mesuré à 28 jours lorsque le taux de substitution en argile rouge dépasse 5%.
- Une diminution de la porosité des MAR lorsque le taux de substitution en argile beige ne dépasse pas 15%.

Pour la première série des MAP (MAR), la faible porosité est enregistrée sur le mortier MAR-20% qui atteinte 11.276. Tandis que pour la deuxième série (MAB), la plus faible porosité est enregistrée sur le mortier (MAB)15%.

L'augmentation de l'âge aussi réduit la porosité des mortiers des deux séries. Les faibles valeurs sont obtenues sur des MAP substitués de 10% d'argile.

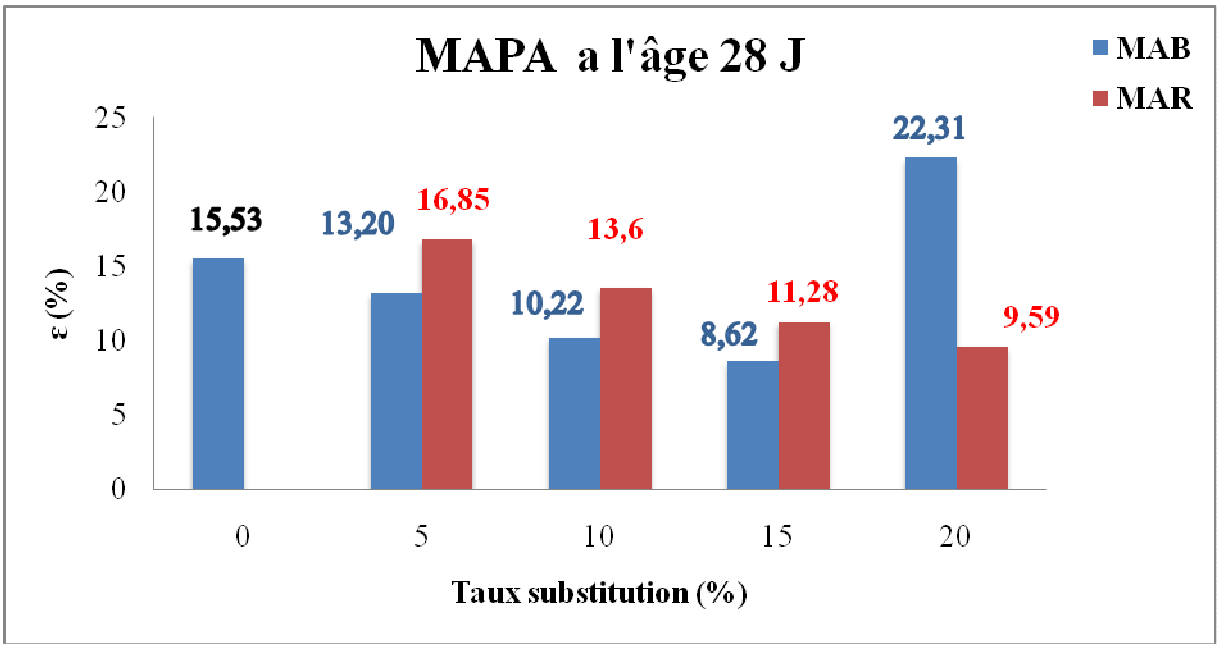


Fig III.15 : la porosité des MAPA à l' âgé 28 Jour

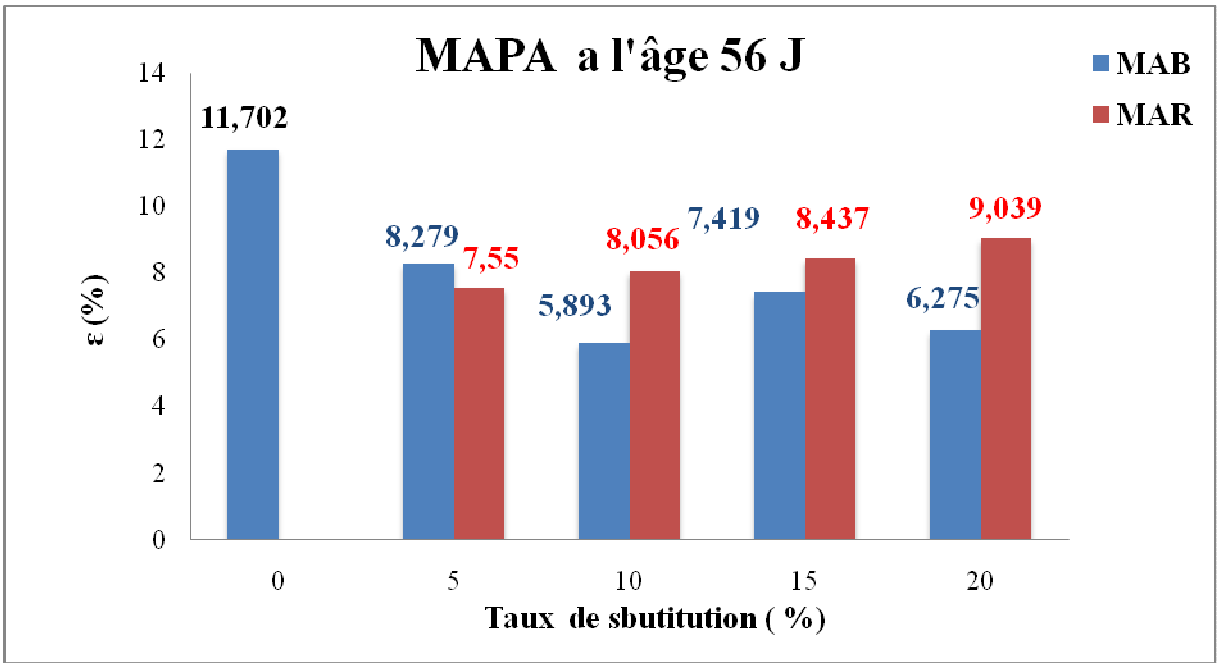


Fig III.16: la porosité des MAPA a l' âge de 56 jour

III.2.6 La résistance au feu

La résistance au feu a été déterminée par essai d'écrasement des éprouvettes après chauffage et refroidissement. Sous les trois températures nous n'avons pas observé l'endommagement ou la variation de forme pour cette raison nous avons passé à l'essai de compression. Les résultats sont présentés dans les figures III.17 et III.18.En effet, Il semble que la substitution du ciment par argile donne une matrice cimentaire qui résiste mieux au feu. Sous 200°C ; la plus grande résistance a été observé sur les MAP de deux séries contenants 5% d'argile. Et sous température élevée (400°C) la meilleure résistance est obtenue sur MAPAB-10%. Les MAP-15% de deux séries résiste mieux à 600°C.

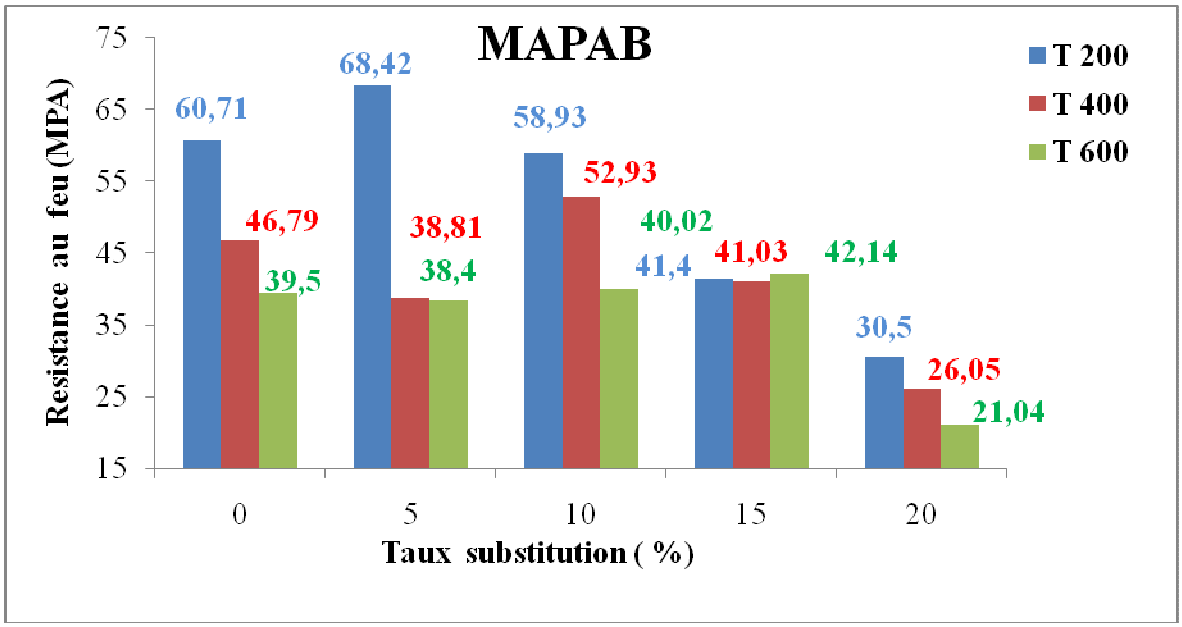


Fig III.17: Resistance au feu des MAPAB

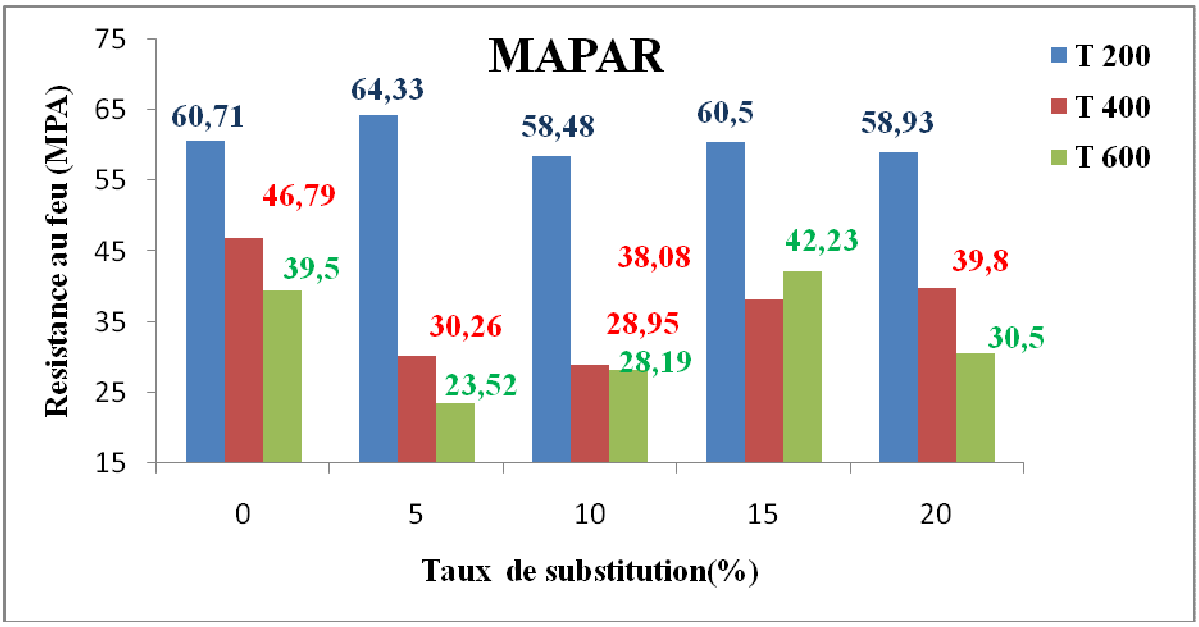


Fig III.18: Resistance au feu des MAPAR

III.2.7. La conductivité thermique

A travers les résultats de l'essai de conductivité thermique illustrés dans la figure 3.19, nous pouvons remarquerque l'argile beige minimise la conductivité thermique de façon remarquable en comparaison avec l'argile rouge. Les meilleures valeurs (faibles) sont obtenues à partir des taux de substitution de15% pour les deux séries.

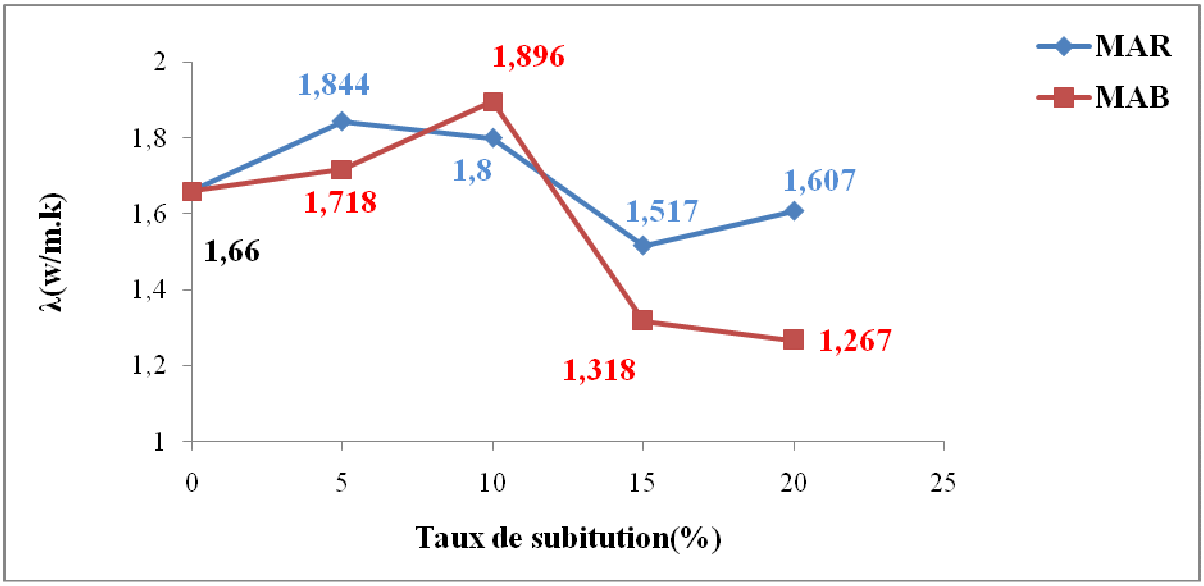


Fig III.19: Conductivité thermique des MAPA

Conclusion (interprétation de résultat)

A la lumière des résultats trouvés dans ce chapitre on peut conclure que :

- La poudre de l'argile donne les meilleurs résultats à l'état frais et durci ainsi que l'approche de durabilité (absorption d'eau, porosité) du MAP brique cuite.
- Un gain de résistance avec une amélioration de la durabilité (diminution du porosité) du MAP sont enregistré lors de la substitution du ciment par la poudre l'argile avec un optimum de 10% pour l'argile rouge et 15% avec l'argile Beige.
- L'amélioration des propriétés de MAPAR et MAPAB est causé par le pourcentage élevé de la silice dans les argiles étudiées, ce composant entre dans la formation de CSH, responsable sur le développement des propriétés physiques et mécanique.
- Le MAP avec la substitution de 10% à 15% du ciment par la poudre de l'argile peut être considéré comme matériau économique et sur la base il est fort recommandé aux ingénieurs du BTP et aux utilisateurs du ciment dans la construction.

Conclusions Générales

Deux objectifs ont été fixés dans ce travail. Nous avons voulu exploiter l'argile comme ajout à caractère pouzzolanique pour produire soit disant un éco-ciment. L'incorporation du matériau à l'avantage de réduire les émissions de CO_2 occasionnées par la fabrication du ciment, d'où l'aspect environnemental de la recherche. Le deuxième objectif a été purement scientifique. Nous avons cherché à travers cette thèse de dévoiler les secrets et les mécanismes qui entourent l'élaboration des pouzzolanes artificielles par calcination des argiles, tous types d'argile.

Il est connu que ces additions réagissent dans la matrice sur deux plans distincts : le premier, d'ordre chimique, est lié à leur pouvoir de réagir avec la chaux issue de l'hydratation du ciment pour produire des nouveaux composants liants (C-S-H). Quant au second, d'ordre chimique, il est attribué à leur finesse, qui leur permet d'acquérir un effet de filler, en conduisant à une matrice plus dense, plus compacte et plus résistante. Dans ce travail, la finesse de deux argiles a été fixée à 4000 cm^2/g.

A travers le protocole utilisé pour la réalisation expérimentale et à la lumière des résultats trouvés on peut conclure que :

1. Il est possible donc de réaliser un MAP écologique en substitution du ciment avec la poudre de l'argile sans réduction notable des propriétés au deux états frai et durci.
2. La fluidité du MAP étudiés dépend du type de l'argile incorporé, l'argile rouge améliore l'ouvrabilité et l'argile beige diminué l'ouvrabilité.

3. L'activité pouzzolanique des argiles n'a pas été détectée qu'à partir de 28 j, et pour une teneur de 10% à 15%.

4. Cette investigation nous a permis de dire qu' on peut obtenir une pouzzolane artificielle à partir de n'importe qu'elle argile. La condition principale, c'est qu'elle peut fournir, après n'importe quel type de traitement, des composants tel que SiO2 permettant le déclanchement des réactions pouzzolaniques.

Enfin, il est a souligné que le travail réalisé, malgré le peut de temps alloué pour la réalisation de la partie expérimentale (en moyenne 3mois) et malgré les difficultés et le manque de moyens au laboratoire, le travail réalisé a été fait en apothéose et les résultats trouvés semblent être prometteurs avec une contribution appréciable dans le domaine de la construction en général et les matériaux de construction en particulier.

Annexes A

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE
Réf : DC/FT MT. v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques	
Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO3 (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%) :	0,3 – 0,75
Composition hypothétique du clinker (Bogue)	
Silicates tricalciques C3S (%) :	58 - 64
Silicates bicalciques C2S (%) :	12 - 18
Aluminates tricalciques C3A (%) :	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF (%) :	10,00 – 12,00
Propriétés physiques	
Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231) :	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5
Temps de prise à 20°C (NA 230)	
Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290
Résistance à la compression (NA 234)	
02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)
Hamraia - Dalas, M'sila (ACC)
Tel: +213 35.50.78.20
Fax: +213 35.55.79.26

Direction générale
33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax: +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)
Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax: +213 (0) 45 84 66 66

LAFARGE لافارج

Annexes B

NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant–Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.
Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme .....Liquide
- Couleur .....brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec.....30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :
Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferraillage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.
Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR .**

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg.et cubitainer 1100 kg
Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

GRANITEX

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

Liste d’abréviation

Notations	Formules chimiques	Noms associés
-	SiO_2	Oxyde de silicium
-	Al_2O_3	Oxyde d’Aluminium
-	Fe_2O_3	Oxyde ferrique
-	CaO	Oxyde de calcium (chaux)
CH	$Ca(OH)_2$	Hydroxyde calcique (portlandite)
-	MgO	Oxyde magnétique
-	SO_3	Trioxyde de soufre
-	Na_2O	Oxyde de sodium
-	K_2O	Oxyde de potassium
-	Cl	clore
-	P_2O_5	Pentoxyde de phosphore
-	TiO_2	Dioxyde de titane
-	CO_2	Dioxyde de carbone
C_3S	$3CaO_2\ SiO_5$	Alite (silicate tricalcique)
C_2S	$2CaO_2\ SiO_4$	Bélite (silicate bi calcique)
C_3A	$3CaO_2Al_2O_3$	Aluminate tricalcique
C_4AF	$4CaO_2Al_2O_3Fe_2O_3$	Aluminoferrite tétracalcique
CSH	$(CaO)_x(SiO)_y(H2O)_z$	Siicate de calcium hydraté

CPA	Ciment portland Artificiel
CPJ	Ciment portland composé
CHF	Ciment de hauts fourneaux
CP	Ciment pouzolanique
CLC	Ciment aux laitiers et aux cendres
CLK	Ciment de laitier au clinker
BAP	Béton autoplacent
MAP	Mortier autoplacent
ESP	Equivalent de sable à piston
ESV	Equivalent de sable vue
S/M	Sable /Mortier
MAPAR	Mortier autoplacent à base d'argile rouge
MAPAB	Mortier autoplacent à base d'argile beige
MAPTM	Mortier autoplacent témoin
E/C	Eau/Ciment
Rc	Resistance à la compression
Rt	Resistance à la traction
Rf	Résistance à la flexion
SP	Super plastifiant
MK	Méta kaolin
DRX	Diffraction de rayon X