

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA - Bejaïa -
Faculté des Sciences Exactes
Département de Chimie

Mémoire de Master

Présenté par :

M.AIT HADJI Toufik

M. BOUKEDJAR Youssouf

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Propriétés physico-chimiques des enduits de façades modifiées

Soutenu le : 26/09/2016

Devant le jury composé de :

M ^f Bourouina Mustapha	Département de Chimie	Président
Mme Meddouri Melaz	Département de Chimie	Examinatrice
M ^f Zidane Youcef	Département de Chimie	Encadreur
M ^f Djatouti madjid	Responsable de laboratoire Sarl mortero	Invité

2015-2016

Remerciements

Tout d'abord qu'il nous soit permis de remercier et d'exprimer notre gratitude envers Dieu de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur : Mr Y.Zidane, de nous avoir fait profiter de ces grandes compétences et ces conseils judicieux et de nous avoir dirigés avec efficacité et grande patience.

Nos vifs remerciements s'adressent également à Messieurs, Bourouina et Meddouri qui ont accepté d'honorer ce jury.

Nous remercions Mr M.Djatouti responsable du laboratoire de la Sarl Mortero, et Mr Tahir responsable au laboratoire LTP -Est, Mme Bélache responsable au laboratoire LGCTP qui nous ont permis de réaliser les tests de compression.

Mr Meraoui, responsable à SPMC (filiale du groupe FERPHOS), pour la fourniture en pouzzolane et pour sa disposition de collaborer avec l'université.

Sans oublier le personnel de la Sarl mortero, des laboratoires de Génie civil et de chimie industrielle de l'université de Béjaïa de tant pour leurs encouragements que pour l'aide qu'ils nous ont apporté à propos de notre travail.

Que toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici le témoignage de nos profondes reconnaissances, nous les remercions vivement pour leur aide précieuse et pour avoir mis à notre disposition leur expérience.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A mon binôme Youcef*
- *A mes très chers parents*
- *A ma chère femme Imane*
- *A mes frères Sofiane, Nabil, Samir et Said*
- *A mes sœur Saida et Sonia*
- *A Moukhtar, Mourad, massi, moussa, hakim Sofiane Et Simou.*
- *A toute ma famille*
- *A tous mes amis*

toufik

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- *A mon binôme Toufik*

- *A mes très chers
parents.*

- *A ma grande mère Zuina.*

- *A mes frères : Tahar, Rabia, Zidane
Méziane et Ismail.*

- *A tous mes sœurs : Salima, Akila, Zahra
Romila*

- *A Lounis, Idir, Takfa, Ouali, Nassim, Katia,
Nadjet, Wassila, Biba et Salma, Yasmine*

- *A tous mes amis*

Youyou

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Page

Introduction générale.....01

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I Généralités sur les enduits.....	03
I.1 Définition de l'enduit.....	03
I.2 Fonctions de l'enduit.....	03
I.3 Normalisation et concept d'enduit.....	04
I.3.1 Aperçu sur la normalisation des enduits.....	04
a. Les cahiers du CSTB ou l'ancien DTU 26.1 de mai 1993.....	04
b. Le nouveau DTU 26.1 d'avril 2008.....	05
I.3.2 Concept d'enduit selon les DTU.....	06
a. Concept selon l'ancien DTU 26.1.....	06
b. Concept selon le nouveau DTU 26.1.....	07
I.4 Typologie et pathologie des enduits.....	07
I.4.1 Typologie des enduits.....	07
a. Selon la conception.....	07
b. Selon le mode de fabrication.....	07
c. Selon les propriétés et/ou domaine d'application.....	08
d. Selon les caractéristiques.....	08
e. Selon le type de support.....	09
I.4.2 Pathologie des enduits.....	10
a. Les efflorescences.....	10
b. Faïençage et fissuration.....	11
c. Pénétration d'eau et décollement.....	11
d. Brûlage ou grillage de l'enduit.....	12

II Techniques de fabrication.....	13
II.1 Les éléments de constitution des enduits.....	13
II.1.1 Les liants minéraux.....	13
II.1.1.1 Le ciment.....	13
II.1.1.2 La chaux.....	14
II.1.1.3 Le plâtre.....	15
II.1.2 Les charges.....	15
II.1.2.1 Les granulats.....	15
II.1.2.2 Les fillers.....	16
II.1.3 L'eau.....	16
II.1.4 Les additifs.....	17
a. Les adjuvants.....	17
b. Les colorants (pigments).....	17
II.2 Réalisation manuelle du mortier.....	17
II.3 Réalisation mécanique du mortier.....	18
III Les enduits monocouches.....	19
III.1 Définition.....	19
III.2 Caractéristiques des enduits monocouches.....	19
III.3 Techniques de mise en œuvre des enduits monocouches.....	21
III.3.1 Préparation du support.....	21
a. Les supports neufs.....	22
b. Les supports anciens.....	22
III.3.2 Choix de l'enduit.....	22
III.3.3 Matériels et techniques d'exécution.....	23
a. Les matériels de travail.....	23
b. Les techniques d'exécution des couches.....	24
IV Présentation des matériaux étudiés.....	25
IV.1 La pouzzolane naturelle.....	25
IV.1.1 Composition chimique de la pouzzolane.....	25
IV.1.2 Types de pouzzolanes.....	26

IV.1.3. Effet de La pouzzolane.....	27
IV.1.4. Propriété de la pouzzolane.....	27
IV.1.5. Caractéristiques techniques de la pouzzolane.....	28
IV.2 La bentonite.....	29
IV.2.1 Définition.....	29
IV.2.2 Origine de la bentonite.....	29
IV.2.3 Application de la bentonite	29
IV.2.4 Structure de la bentonite.....	29
IV.2.5 La bentonite en Algérie	30
IV.3 Le tuf.....	30
IV.3.1 Historique	30
IV.3.1 Définitions des tufs.....	31
IV.3.2 Types de tuf	31
a- Tuf volcanique	31
b- Les tufs calcaires.....	32

ÉTUDE EXPERIMENTALE

V.1 Introduction	35
V.2 Présentation de la SARL Mortero.....	35
V.2.1. Historique.....	35
V.2.2 Présentation des produits.....	36
V.3 Méthodologie d'étude.....	37
V.3.1 Choix des matériaux.....	37
V.3.2 Composition des mélanges à réaliser.....	37

V.4 Protocoles expérimentaux.....	39
V.4.1 Confection des éprouvettes et conditions de conservation.....	39
V.4.2 Détermination de la masse volumique.....	39
V.4.3 Essai de consistance.....	39
a. Matériel utilisé.....	39
b. Mode opératoire.....	40
V.4.4 Essai de rétention d'eau.....	41
a- Description de l'appareillage.....	41
b- Mode opératoire.....	41
c- Mesure et calcul.....	41
V.4.5 L'absorption d'eau par capillarité.....	42
V.4.6 Résistance à la compression.....	42
V.4.7 Spectroscopie IRTF.....	43
V.4.8 Caractérisation morphologique par le M.E.B.....	44

RESULTATS ET DISCUSSION

VI.1 Introduction.....	46
VI.2 Résultats obtenus.....	46
VI.3 Interprétation des résultats.....	48
VI.3.1 Masse volumique des mortiers à l'état durci.....	48
VI.3.2 Taux de gâchage.....	50
VI.3.3 Rétention d'eau.....	52
VI.3.4 Absorption d'eau par capillarité.....	53
VI.3.5 Résistance à la compression à 28 jours.....	53
VI 3.6 Les spectres IR.....	55

Conclusion générale	57
---------------------------	----

Annexes.....58

Liste des Abréviations

Abréviations utilisées dans la suite du texte :

CL : (Calcic Lime) : chaux calciques

CR : (Color Renders) : mortier d'enduit de parement

CS : (Compressive Strength) : résistance mécanique

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

DL : (Dolomitic Lime) : chaux dolomitiques

DTU : Documents Techniques Unifiés

FL : (Formulated Lime) : chaux formulées

GP : (General Purpose) : mortier d'enduit d'usage courant (enduit traditionnel)

HL : (Hydraulic Lime) : chaux hydrauliques

LW : (LighWeight) : mortier d'enduit allégé

MERUC : Masse, Elasticité, Résistance, humidification, Capillarité

NHL : (Natural Hydraulic Lime) : chaux hydrauliques naturelles

OC : (One Coat) : mortier d'enduit monocouche (OC1, OC2 ou OC3)

R : (Resistant) : mortier d'enduit d'assainissement

Rc : résistance à la compression

Re : La rétention d'eau

Rt : Résistance à la traction du support (Rt 1, Rt 2 ou Rt 3)

Tg : taux de gachage

T : (Thermal) : mortier de conductivité thermique

W : (Water) : absorption d'eau par capillarité

MR : mortier de référence

MB : mortier de bentonite

MT : mortier de tuf

MPz : mortier de pouzzolane

IR-FT : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

MEB : microscopie électronique à balayage

Liste des figures

Figure 01 : Principales fonctions de l'enduit.....	03
Figure 02 : Phénomène d'absorption et évaporation d'eau sur les enduits.....	04
Figure 03 : Etapes d'évolution du DTU 26.1.....	06
Figure 04 : Composition du ciment.....	14
Figure 05 : Cycle de transformation de la chaux.....	15
Figure 06 : Composition des enduits monocouches (lourds et légers).....	19
Figure 07: Choix de l'enduit selon la nature du support.....	23
Figure 08 : Exemples d'applications et les épaisseurs correspondantes.....	24
Figure 09 : Pouzzolane brute de Bouhamidi.....	26
Figure 10: Structure de la montmorillonite.....	29
Figure 11: Appareil de VICAT.....	40
Figure 12 : Dispositif d'aspiration d'eau sous dépression.....	41
Figure 13 : Dispositif de rupture en compression.....	43
Figure 14: L'appareil IR Affinity-1 utilisé pour l'analyse IRTF.....	44
Figure 15:Le microscope utilisé pour visualiser la morphologie de nos échantillons.....	45
Figure 16 : évolution de la masse volumique des mortiers en fonction de la teneur en.....	48
Figure 17 : évolution des taux des gâchages des mortiers en fonction de la teneur en.....	50
Figure 18 : photo prise sur le MT avec un zoom de 3000.....	51
Figure 19 : photo prise sur le MPz avec un zoom de 3000.....	51
Figure 20 : photo prise sur le MR avec un zoom de 3000.....	51
Figure 21 : photo prise sur le MB avec un zoom de 3000.....	52
Figure 22 : évolution de la rétention d'eau des mortiers en fonction de la teneur en.....	52
Figure 23: évolution de la résistance a la compression des mortiers en fonction de la.....	53
Figure 24 : spectre IR des quatre mortiers.....	55

Figure 25 : dispositif d'essai de la résistance à la compression.....	58
Figure 26 : rupture d'un quart d'éprouvette.....	58
Figure 27 : évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de la bentonite en fonction de l'âge du mortier.....	61
Figure 28: évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de tuf en fonction de l'âge du mortier.....	61
Figure 29: évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de la Pouzzolane en fonction de l'âge du mortier.....	62
Figure 30 : confection des éprouvettes.....	62
Figure 31 : dispositif de la détermination de l'absorption d'eau par capillarité.....	63
Figure 32: spectre IR de MR et de MB.....	64
Figure 33 : Spectre IR de MR et MT.....	64
Figure 34 : Spectre IR de MR et MPz.....	65
Figure 35: photo prise sur le MR avec un zoom de 6000.....	65
Figure 36 : photo prise sur le MPz avec un zoom de 6000.....	66
Figure 37 : photo prise sur le MB avec un zoom de 6000.....	66
Figure 38 : photo prise sur le MT avec un zoom de 6000.....	66

Liste des tableaux

Tableau 01 : Classification des enduits suivant le MERUC.....	05
Tableau 02 : Types de mortiers selon leur conception et fabrication.....	07
Tableau 03 : Caractérisation des enduits de façade.....	09
Tableau 04 : Choix de type d'enduit en fonction du support.....	10
Tableau 05 : Effet de type d'adjuvant sur le mortier.....	17
Tableau 06 : Catégories de rétention d'eau des enduits monocouches.....	21
Tableau 07: Choix de l'enduit selon sa classe de résistance.....	23
Tableau 08 : Caractéristique physiques de la pouzzolane naturelle.....	25
Tableau 09 : Analyse chimique de la Pouzzolane.....	25
Tableau 10 : Composition chimique de la bentonite de Maghnia.....	30
Tableau 11 : Quantités de matériaux pour l'enduit référence MR.....	38
Tableau 12 : Quantités de matériaux pour l'enduit à base de bentonite MB.....	38
Tableau 13: Quantités de matériaux pour l'enduit à base de tuf MT.....	38
Tableau 14 : Quantités de matériaux pour l'enduit à base de pouzzolane MPz.....	38
Tableau 15 : Résultats des tests sur le mortier référence MR.....	47
Tableau 16: Résultats des tests sur les mortiers de la bentonite.....	47
Tableau 17 : Résultats des tests sur les mortiers de le tuf.....	47
Tableau 18 : Résultats des tests sur les mortiers de pouzzolane.....	47
Tableau 19 : Résultats des essais de la compression pour le 28 jours.....	48
Tableau 20 : Analyse du spectre IR des quatre mortiers.....	56
Tableau 21 : détails des mesures de résistances R_c des mortiers à 7 jours.....	59
Tableau 22 : détails des mesures de résistances R_c des mortiers à 14 jours.....	59
Tableau 23 : détails des mesures de résistances R_c des mortiers à 21 jours.....	60
Tableau 24 : détails des mesures de résistances R_c des mortiers à 28 jours.....	60
Tableau 25 : détails de mesure des coefficients d'absorption d'eau des mortiers.....	63

Introduction

Introduction

L'habitat, qu'il soit traditionnel ou moderne, a besoin au cours de sa vie, d'être protégé contre les effets de la pluie et ses conséquences (érosion, remontée d'humidité), du soleil et de son incidence sur le confort thermique, des effets des milieux agressifs et enfin des effets du vent.

La protection des constructions contre l'effet de ces hostilités est donc une préoccupation majeure qui fait appel à la rigueur et au savoir-faire des professionnels du domaine. Les constructions auraient beau être réalisées selon toutes les règles de l'art mais les défaillances observées au niveau du poids et des coûts de l'enduit enlèvent à l'ouvrage toute sa valeur. Aujourd'hui, l'importance des enduits dans les constructions n'est plus à démontrer tant ils apportent confort, protection et esthétique à l'habitat, mais les surcharges qu'ils apportent ces enduits aux bâtis et leurs coûts restent un défi au regard des exigences constructives mais aussi de la situation économique difficile de nos jours.

Aujourd'hui avec l'avancée technologique dans la production et la découverte des matériaux, la réalisation des enduits requiert de plus en plus des matériaux plus légers et moins coûteux adaptés à chaque type de cas.

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique. En effet, le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de mortier, entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges et conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre.

Une des voies d'allègement envisageable pour le mortier est le remplacement d'une fraction des granulats habituels, qui constituent environ les 3/4 de la masse du mortier, par des granulats plus légers, naturels ou artificiels.

Face à tous ces facteurs qui posent de grands problèmes quant à la prédiction de la légèreté et de l'expansibilité des enduits, il vient tout naturellement les interrogations suivantes : Quelles sont les caractéristiques de l'enduit normalisé qu'il faut prendre en compte ? Quels sont les matériaux adaptés à la réalisation des enduits légers ? Et en fin quel enduit, réalisé, répondra-t-il à ces exigences ?

La réponse à ces questions a été la préoccupation majeure tout au long de ce travail.

Objectifs de l'étude

L'objectif général de notre étude consiste à apporter notre contribution à la valorisation des matériaux minéraux locaux tels que : la bentonite, le tuf et la pouzzolane en vue d'alléger les enduits de façades. Le nouvel enduit ainsi obtenu devra répondre aux exigences des normes de réalisation, et présenter des performances égales, si non meilleures que celles des mortiers conventionnels.

La réalisation de cet objectif est envisagée à travers trois points à savoir :

- Analyser et déterminer les caractéristiques d'un enduit normalisé;
- réaliser et tester expérimentalement les enduits obtenus ;
- interpréter les résultats des essais réalisés.

L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil

L'introduction des ajouts dans la confection du mortier présente un facteur bénéfique car la consommation en ciment baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker (ciment) 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

Etude bibliographique

Chapitre I

Généralités sur les enduits

I.1 Définition de l'enduit

L'enduit est par définition un mélange pâteux avec lequel on recouvre une paroi de maçonnerie brute, appelée support, pour lui donner en général une surface uniforme et plane. Ils constituent la finition extérieure visible de la construction.

Il a un rôle à la fois protecteur à la maçonnerie (contre les intempéries) et décoratif (aspect et couleur). L'enduit désigne également un ouvrage de revêtement pour garnir, protéger ou finir une surface. Il protège les constructions de l'humidité et de l'usure du temps.

Les enduits aux mortiers de liants hydrauliques sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réparation de façades, donnant au support un caractère d'imperméabilisation, tout en le laissant respirer.

Les enduits sont constitués d'un liant (chaux, plâtre, ciment ou terre) et de charges minérales (agréats, ou granulats, comme le sable ou la poussière de marbre,...) et d'adjuvants appropriés. L'adjonction de pigments (charges colorantes) n'est pas indispensable, elle dépend de l'effet recherché.

I. 2 Fonctions de l'enduit

Suivant leur nature, les enduits extérieurs assurent une ou plusieurs des trois fonctions suivantes qui sont présentées dans la figure qui suit :

- Le **dressage** : en rattrapant les irrégularités du gros œuvre. Son aspect lisse favorise le ruissellement ;
- La **protection** : en assurant l'imperméabilisation de la paroi, tout en laissant respirer le support
- La **décoration** : en donnant l'aspect final de la façade (le parement). Cette fonction apporte sur la façade une esthétique importante par la composition, la coloration et le rapport qu'elle établit avec les autres éléments architecturaux du bâtiment [1].

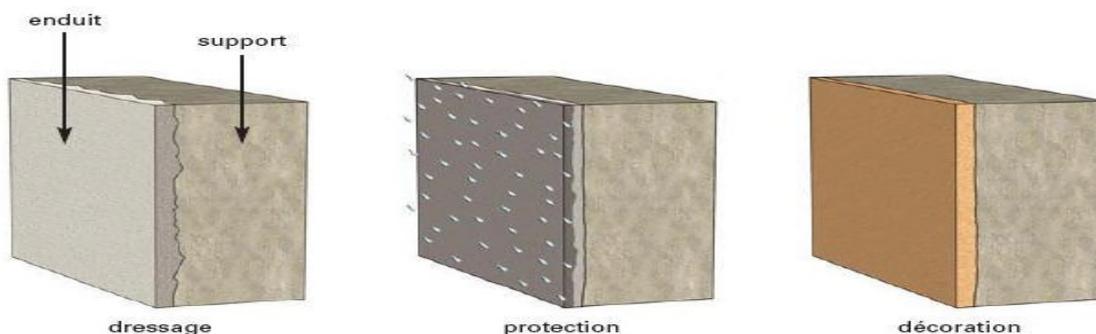


Figure 01 : Principales fonctions de l'enduit

La fonction «imperméabilisation» diffère de la fonction «étanchéité» en ce sens que l'imperméabilisation conférée à la paroi n'est généralement pas conservée en cas de fissuration du support [1]. L'absorption d'eau par capillarité conditionne en partie la fonction d'imperméabilisation qui dépend également du nombre de couches et de l'épaisseur d'enduit.

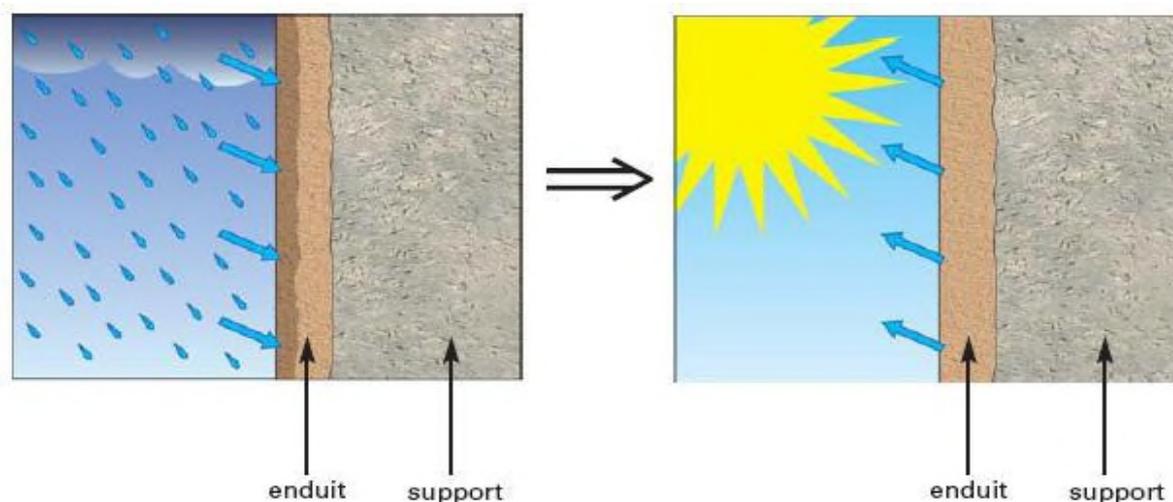


Figure 02 : Phénomène d'absorption et d'évaporation d'eau sur les enduits

La texture varie selon les modes d'application de l'enduit. Ceux-ci sont en fonction de l'architecture du bâti, de l'époque de construction mais également de la composition des mortiers. Ainsi, il n'est pas sans intérêt dans le paragraphe qui suit de faire un aperçu sur les normes qui ont marqué la connaissance et l'évolution des techniques sur les enduits.

I.3 Normalisation et concept d'enduit

Dans ce paragraphe, il sera examiné le concept d'enduit traditionnel à travers les *Documents Techniques Unifiés* (DTU).

I.3.1 Aperçu sur la normalisation des enduits

a. Les cahiers du CSTB ou l'ancien DTU 26.1 de mai 1993 : Le Cahier des Prescriptions Techniques de 1993, cahiers du CSTB 2669-2 ou encore Document Technique Unifié (DTU) de mai 1993 est un document technique qui normalise la fabrication et l'exécution des mortiers d'enduit. Il est structuré en deux parties distinctes : la partie **application traditionnelle** (Enduits aux mortiers de ciment, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne) et la partie **application monocouche** (Enduits monocouches d'imperméabilisation). Dans ce document, la classification des enduits porte sur cinq caractéristiques dites *MERUC*.

Tableau 01 : Classification des enduits suivant le MERUC [2]

Caractéristique	Classification					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Masse volumique apparente (Kg /m ³)	< 1200	Entre 1000 et 1400	Entre 1200 et 1600	Entre 1400 et 1800	Entre 1600 et 2000	> 1800
Module d'élasticité (MPa)	E1 < 5000	E2 Entre 3500 et 7000	E3 Entre 5000 et 10000	E4 Entre 7500 et 14000	E5 Entre 12000 et 20000	E6 > 16000
Résistance à la traction (MPa)	R1 < 1,5	R2 Entre 1,0 et 2,0	R3 Entre 1,5 et 2,7	R4 Entre 2,0 et 3,5	R5 Entre 2,7 et 4,5	R6 > 3,5
Rétention d'eau (%)	U1 < 78	U2 Entre 72 et 85	U3 Entre 80 et 90	U4 Entre 86 et 94	U5 Entre 91 et 97	U6 > 95
Capillarité (g/dm ² .min ^{1/2})	C1 < 1,5	C2 Entre 1,0 et 2,5	C3 Entre 2 et 4	C4 Entre 3 et 7	C5 Entre 5 et 12	C6 > 10

b. Le nouveau DTU 26.1 d'avril 2008 : Le développement de l'industrialisation des enduits a fortement favorisé la diffusion des enduits monocouches qui représentent aujourd'hui plus de 80% des enduits de façades réalisés en travaux neufs [3]. Ce nouveau constat a amené les professionnels du domaine à réviser le DTU de 1993, en intégrant les enduits monocouches et en redéfinissant la terminologie norme produit NF EN 998.1 dans le nouveau DTU 26.1 intitulé '**Travaux d'enduits de mortiers**'.

Ainsi le nouveau DTU 26.1 d'avril 2008 est divisé en trois parties et se présente comme suit, comparativement à celui de mai 1993 :

Dans ce nouveau document, les principales évolutions sont :

1. La suppression de la classification des supports en catégorie A et B ;
2. La nouvelle classification des supports en Rt1, Rt2 et Rt3 ;
3. La classification des enduits selon le MERUC devient obsolète ;
4. Désormais les enduits monocouches font pleinement partie des techniques traditionnelles ;
5. La reprise de terminologie de la norme produit NF EN 998.1.

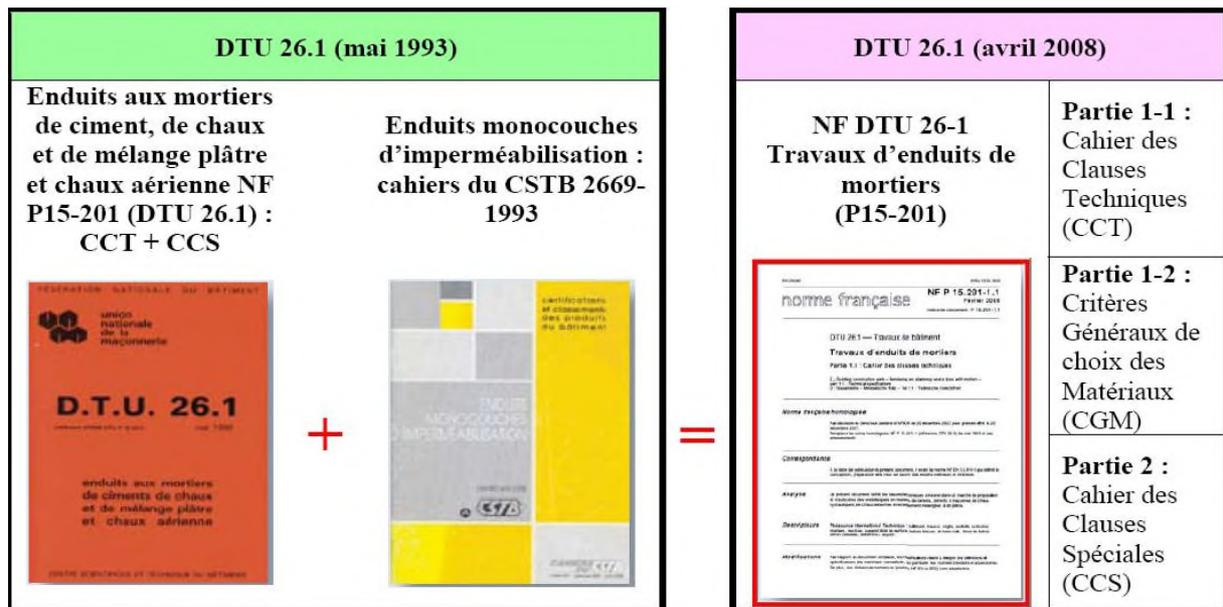


Figure 03 : étapes d'évolution du DTU 26.1

I.3.2 Concept d'enduit selon les DTU

a. Concept selon l'ancien DTU 26.1 : L'ancien DTU distingue les enduits traditionnels, les enduits monocouches et les revêtements plastiques épais (RPE) ou semi épais (RSE).

Sont désignés sous le nom d'enduits traditionnels dans l'ancien DTU, tous les enduits de composition traditionnelle (ciment, chaux, sable), posés soit en trois couches appliquées manuellement, soit en deux couches à l'aide d'une machine à projeter :

- La première couche, le **Gobetis**, est destinée à « accrocher » l'enduit sur le mur. Elle est la plus fortement chargée en liant et elle est appliquée par projection ou manuellement en couche mince préparatoire pour régulariser la porosité du support de maçonnerie;
- La deuxième couche, le **corps d'enduit**, est plus épaisse et appliquée après plusieurs jours de séchage du gobetis. Elle assure l'essentiel de l'imperméabilisation ;
- La troisième couche, la **finition**, est plus mince et contient le moins de liant : ces caractéristiques sont essentielles pour éviter le faïençage et la fissuration. Elle protège le mur de l'érosion et le décore en lui donnant texture et couleur.

Les enduits monocouches sont distingués des enduits traditionnels par le fait que ce sont des produits fabriqués industriellement, contenant en faible quantité des adjuvants permettant de faciliter la mise en œuvre et d'améliorer la performance. Ils sont livrés « prêts à gâcher » sur le chantier.

En ce qui concerne les revêtements plastiques dans l'ancien DTU, il ne s'agit pas d'enduit au sens d'enduit traditionnel ou d'enduit monocouche, mais d'une couche de protection

décorative appliquée soit sur un mur en béton dont on a préparé la surface, soit sur un mur revêtu d'un enduit traditionnel. On distingue les enduits de parements hydrauliques et les enduits de parements plastiques.

b. Concept selon le nouveau DTU 26.1 : Dans la terminologie du nouveau DTU, les enduits traditionnels désignent une famille d'enduits bien connue : les enduits monocouches, les enduits multicouches. Le nouveau DTU qualifie un enduit de «traditionnel» lorsque cet enduit est bien connu par ses caractéristiques et par sa technique de mise en œuvre. Or les enduits dits monocouches sont mis en œuvre selon une technique reconnue depuis les années 1970, de ce fait, aujourd'hui ils sont aussi des enduits traditionnels.

I.4 Typologie et pathologie des enduits

I.4.1 Typologie des enduits

Auparavant (ancien DTU 26.1), les mortiers d'enduit étaient uniquement définis par leurs recettes (dosage des liants et des sables), préparés sur le chantier ou dosés et pré mélangés en usine. Aujourd'hui, ils sont normalisés (NF EN 998-1) et définis selon leur conception, leur mode de fabrication et leurs propriétés et/ou domaine d'application.

a. Selon la conception

Mortier de recette

Lorsqu'il est fabriqué suivant des proportions de constituants prédéterminées dont résultent des propriétés spécifiques (concept de recette), le mortier est dit “ **mortier de recette** ”. Il est défini par sa composition. Il peut être mélangé sur chantier (mortier de chantier) ou en usine (mortier industriel).

Mortier performancier

Lorsque la conception et la méthode de fabrication ont été choisies par le fabricant en vue d'obtenir des caractéristiques spécifiques (concept de performance), le mortier est dit “**performancier**”. Il est défini par ses caractéristiques et performances. Il ne peut être mélangé qu'en usine (mortier industriel). Les monocouches entrent dans cette catégorie.

Tableau 2 — Types de mortiers selon leur conception et fabrication

	Mortier de recette (composition)	Mortier performancier (formulé)
Mortier de chantier	Oui	Non
Mortier industriel	Oui	Oui

b. Selon le mode de fabrication

Mortier de chantier

Lorsqu'il est composé de constituants individuels (chaux, ciments, sables, adjuvants) dosés et mélangés sur le chantier, le mortier est dit “ **mortier de chantier** ”.

Mortier industriel

S'il est dosé et mélangé en usine, c'est un " **mortier industriel** ". Il est alors fourni sous forme de mortier " sec " (poudre), prêt à gâcher avec de l'eau ou sous forme de " mortier frais " (pâte), prêt à l'emploi.

Mortier pré dosé

Un " **mortier pré dosé** " est un enduit dont les constituants sont entièrement dosés en usine et livrés sur le chantier où ils sont mélangés selon les spécifications et les conditions indiquées par le fabricant.

Mortier pré mélangé

Un " **mortier pré mélangé** " est entièrement dosé en usine et livré sur le chantier où d'autres constituants, spécifiés ou fournis, sont ajoutés selon les spécifications et les conditions indiquées par le fabricant (ex. liants spéciaux avec ajout du sable sur chantier).

c. Selon les propriétés et/ou domaine d'application

Mortier courant

Un " **mortier courant** " (GP) est un mortier d'enduit qui n'a pas de propriétés spécifiques et qui peut être conçu comme un mortier de recette ou un mortier performanciel. Il correspond pratiquement au mortier (de sous enduit) destiné à la réalisation du corps d'enduit.

Mortier allégé

Un " **mortier allégé** " (LW) est un mortier d'enduit performanciel dont la masse volumique durcie à l'état sec est inférieure à 1300 kg/m^3 .

Mortier d'enduit de parement

Un " **mortier d'enduit de parement** " (CR) est un mortier d'enduit performanciel spécialement coloré, utilisé pour la couche de finition décorative.

Mortier d'enduit monocouche

Un " **mortier d'enduit monocouche** " (OC) est un mortier performanciel appliqué en une seule couche (mais en une ou deux passes avec le même mortier) qui remplit les mêmes fonctions qu'un système d'enduit multicouche extérieur coloré. Les mortiers d'enduits monocouches sont fabriqués avec des granulats courants lourds et/ou légers.

Mortier d'enduit d'assainissement

Un " **mortier d'enduit d'assainissement** " (R) est un mortier performanciel utilisé pour la réalisation d'enduits sur maçonneries humides contenant des sels solubles à l'eau. Il présente une porosité et une perméabilité à la vapeur d'eau élevée ainsi qu'une absorption d'eau par capillarité réduite.

d. Selon les caractéristiques : Les mortiers d'enduits sont désignés selon les caractéristiques de l'enduit durci. Il est rare qu'un même enduit possède toutes les propriétés pour assurer les fonctions du dressage, d'imperméabilisation et de décoration du support.

La résistance à la compression à 28 jours, définit par le coefficient **CS** sur une échelle allant de I à IV, indique leur résistance aux chocs (CS IV par exemple, correspondant aux enduits les plus résistants).

L'absorption d'eau par capillarité, coefficient **W**, est choisie en fonction de l'exposition de l'enduit à la pluie. Sur les surfaces enduites exposées à la pluie, un fort coefficient (W2) est recommandé. Le coefficient d'absorption doit être progressif de la première

couche à la finition. L'absorption d'eau par capillarité (W) d'un enduit est indépendante de sa perméabilité à la vapeur d'eau (μ). Il est possible qu'un enduit imperméable à l'eau soit perméable à la vapeur d'eau. C'est en particulier le cas des enduits d'assainissement (R). Toutefois cette propriété finale est conditionnée par l'épaisseur de l'enduit ou du système d'enduit.

Ces caractéristiques sont complétées par **la rétention d'eau (Re)**. Celle-ci caractérise l'aptitude du mortier frais à conserver son eau de gâchage pour permettre l'hydratation des liants hydrauliques et obtenir une bonne adhérence et une bonne cohésion finale de l'enduit. L'emploi en première couche ou monocouche d'un mortier frais fortement rétenteur d'eau est recommandé par temps chaud ou vent sec, en particulier sur les supports de maçonnerie poreux ou absorbants. La conductivité thermique intervient pour le calcul des déperditions thermiques de la paroi.

Tableau 03 : Caractérisation des enduits de façade

Propriétés	Norme d'essai	Catégories	Valeurs
Résistance à la compression (après 28 jours)	NF EN 1015-11	CS I	0,4 à 2,5 MPa
		CS II	1,5 à 5 MPa
		CS III	3,5 à 7,5 MPa
		CS IV	≥ 6 MPa
Absorption d'eau par Capillarité	NF EN 1015-18	W0	Non spécifié
		W1	$C \leq 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
		W2	$C \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Rétention d'eau	-	Faible	$Re < 86\%$
		moyenne	$86\% \leq Re \leq 94\%$
		Forte	$Re > 94\%$

e. Selon le type de support : La résistance mécanique du support conditionne le choix de l'enduit. Il ne faut pas réaliser un enduit dur sur un support de maçonnerie tendre ou fragile. **La résistance des supports (Rt)** de maçonnerie aptes à recevoir un enduit est, notamment, caractérisée par la valeur de résistance à l'arrachement minimale. La nouvelle classification des supports introduite dans le DTU 26.1 est:

Rt3, résistance à l'arrachement élevée ($Rt \geq 0,8$ MPa) : blocs de béton courants, briques et blocs de terre cuite ;

Rt2, résistance à l'arrachement moyenne ($0,6 \leq Rt \leq 0,8$ MPa) : blocs de béton de granulats légers, briques et blocs de terre cuite à cohésion moyenne ;

Rt1, résistance à l'arrachement réduite ($0,4 \leq Rt \leq 0,6$ MPa) : blocs de béton cellulaire autoclaves.

Tableau 04 : Choix de type d'enduit en fonction du support

Caractéristiques des enduits en fonction du support		
Type de maçonnerie à enduire	Enduit performanciel	
	Multicouche	Monocouche
Rt3 (ex : blocs de béton, briques)	CS I à CS IV	OC 1 – OC 2 – OC 3
Rt2 (ex : briques)	CS I à CS III	OC 1 – OC 2
Rt1 (ex : béton cellulaire)	CS I ou CS II	OC 1

I.4.2 Pathologie des enduits

Aucune technique ne peut évoluer sans que se commettent des erreurs par ignorance, légèreté ou excès d'audace: c'est la rançon du progrès. Les enduits ne peuvent échapper à cette règle. Des surprises nous attendent encore, car l'épreuve du temps n'a pas joué complètement.

Les causes principales des sinistres des enduits sont dues : soit aux fautes de conception dues à la méconnaissance du produit soit aux fautes d'exécution dues à la méconnaissance volontaire ou non des conditions d'application des produits et leurs limites.

a. Les efflorescences

- **Efflorescences au séchage** : Elles résultent de la formation d'un dépôt cristallin blanchâtre à la surface des enduits à base de liants calciques ou hydrauliques. Il s'agit le plus souvent de carbonatation (formation de cristaux de carbonate de chaux) de la chaux libre (soluble dans l'eau) qui, au lieu de s'effectuer à l'intérieur de l'enduit se produit à la surface. Ce phénomène apparaît surtout lorsque l'enduit est appliqué par temps froid et humide. Le temps de séchage plus long du fait des conditions permet à la chaux, en solution dans l'eau de gâchage en excès, de migrer jusqu'à la surface de l'enduit [5].

Si ce phénomène est très gênant, il peut être atténué par un lavage à l'eau acidulée (10 % d'acide chlorhydrique) ou à l'aide de produits destinés à cet usage, accompagnés d'un brossage et suivis d'un ou plusieurs rinçages.

- **Carbonatation différentielle à long terme** : La carbonatation est la réaction de prise de la chaux aérienne ou hydraulique par absorption du gaz carbonique de l'air. Cette dernière n'est possible qu'en présence d'eau. La vapeur d'eau se combine avec les molécules de gaz carbonique, ce qui forme de l'acide carbonique qui réagit avec l'hydroxyde de calcium qui est une base, et génère donc du carbonate de calcium et de l'eau. Pour simplifier, on a donc:



Des différences de teintes peuvent également se produire à long terme sur un enduit soumis à des conditions d'exposition différentes (parties protégées de la pluie par un balcon, une avancée, des volets toujours ouverts ou au contraire soumises à des ruissellements abondants par absence de gouttières...)

Du fait des cycles "humidification-séchage" auxquels sont soumises les parties les plus exposées, le même phénomène de migration de chaux libre et de carbonatation en surface se produit, provoquant l'éclaircissement de la teinte de l'enduit. Il peut survenir après un phénomène de grillage (dessiccation trop rapide) non observé [5].

b. Faïençage et fissuration Les principales causes sont liées soit au support, soit à l'application suite :

- À l'excès d'eau de gâchage qui augmentant le retrait ;
- A l'humidification insuffisante du support ;
- Au surdosage en liant (enduit taloché en particulier) ;
- Aux conditions atmosphériques : temps chaud, vent sec. La ré-humidification de l'enduit est alors nécessaire ;
- À une épaisseur d'application trop importante (réserver les fortes épaisseurs pour les sous couches) ;
- À des variations d'épaisseur importantes localement liées à des irrégularités du support (faire d'abord une sous couche qui assumera la fissuration et qui après séchage ne la transmettra pas à la finition) ;
- Au temps d'attente trop court entre les couches ;
- Au temps de malaxage non constant ou trop court [5].

c. Pénétration d'eau et décollement : En l'absence de fissures, les pénétrations d'eau par porosité de l'enduit sont rares et essentiellement dues à des épaisseurs de recouvrement du support insuffisantes. Un bon serrage de l'enduit (sous couche) améliore dans tous les cas son comportement.

Le décollement de l'enduit est généralement consécutif à une préparation mal adaptée du support ou à l'application d'un enduit inadapté à son support :

- Présence d'huiles de démoulage ou de poussières ;
- Support peint non décapé ou enduit en place pas assez performant et insuffisamment décroûté ;
- Humidification insuffisante du support ou support gorgé d'eau ;
- « « Absence de couche d'accrochage ou de fixation du support si l'enduit le nécessite. (Ex : résine d'accrochage latex sur support béton) ;

d. Brûlage ou grillage de l'enduit

Ce terme traduit un séchage trop rapide de l'enduit soit par absorption d'eau du support,

soit par évaporation du fait des conditions atmosphériques (temps chaud, vent sec) et qui se caractérise généralement par un poudrage de l'enduit en surface ou par une mauvaise adhérence au support. Une réhumidification de l'enduit dans les jours qui suivent l'application (pendant 2 à 3 jours) permet de limiter cette déshydratation trop rapide. Ce phénomène est d'autant plus sensible que l'épaisseur d'application est faible [5].

En conclusion, on peut dire que les désordres d'enduits sont rarement spectaculaires et impressionnants quand il n'y a pas de chutes abondantes de matériau. Il s'agit de fissures qui ne semblent contrarier que l'aspect de l'ouvrage.

Mais dès que l'humidité peut pénétrer, elle se répand dans le mur, ressort dans le local et les dégâts qu'elle provoque sont souvent considérables. Les sinistres d'enduit ne sont chers, disent les assureurs, que par les dégâts indirects causés par l'humidité [7].

La qualité d'un enduit s'obtient donc par la double condition : qualité de la conception et qualité de l'exécution.

Chapitre II

Techniques de fabrication

II.1 Les éléments de constitution des enduits

Un enduit est constitué d'un mélange de liants et de charges mis en œuvre avec de l'eau. À ces constituants, divers additifs sont généralement ajoutés dans certains cas, des renforts sont associés à l'enduit, avant ou pendant sa mise en œuvre.

II.1.1 Les liants minéraux

Ils permettent l'agglomération des différents constituants pour aboutir, après durcissement, au matériau mécaniquement cohésif.

II.1.1.1 Le ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1550 C°, température de fusion. Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau, et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [8].

-Composition du ciment : Le ciment est caractérisé par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques (la forme et la finesse des grains). Les grains de ciment sont hétérogènes et polyphasés. Au contact de l'eau ils donnent naissance à des produits dont la composition chimique est variable. Il est principalement composé de clinker, de sulfate de calcium, et d'ajouts éventuels [9].

- Le Clinker : C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (Gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. [8]

Les éléments simples (CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants.

- Silicate tricalcique (C₃S) : 3CaO.SiO₂ (Alite).
- Silicate bi calcique (C₂S) : 2CaO.SiO₂ (Belite).
- Aluminate tricalcique (C₃A) : 3CaO.Al₂O₃.
- Ferro aluminate calcique (C₄AF) : 4CaO .Al₂O₃ .Fe₂O₃ (Célite).

-Le sulfate de calcium : Il est ajouté au ciment pour réguler la prise

-Les ajouts éventuels : (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers et les fumées de silice). On les ajoute au ciment pour des raisons économiques et/ou pour leurs propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.



Figure04 : composition du ciment

II.1.1.2 La chaux

La chaux est obtenue par la cuisson dans un four de roches calcaires plus ou moins pures portées à une température de l'ordre de 900 °C à 1000 °C. Sous l'effet de chaleur, le carbonate de calcium dont est constitué de calcaire se transforme en oxyde de calcium et dégage du gaz carbonique. Cette matière prend le nom de chaux vive.

Mise en contact de l'eau, la chaux vive produit une intense chaleur et se transforme en hydroxyde de calcium. Selon la proportion d'eau introduite, on obtient sans opération de broyage, de la chaux éteinte, sous forme de poudre ou de pâte (la chaux grasse). L'extinction de la chaux vive s'effectue dans des fosses emplies d'eau ou bien dans des bidons. C'est ce produit qui sert de liant aux charges diverses utilisées dans la préparation des mortiers de maçonnerie et des enduits de protection ou de décor [10].

Selon la nature du calcaire utilisé, on obtient plusieurs types de chaux :

- Un calcaire très peu siliceux donne des chaux calciques ou aériennes.
- Un calcaire moyennement siliceux donne des chaux hydrauliques.

Les chaux aériennes (CL)

Issues de calcaires très peu siliceux, elles ont une utilisation limitée dans la construction car très handicapées par leur manque d'hydraulicité naturelle. On les bâtarde parfois avec des liants hydrauliques pour sécuriser l'ouvrage. Ces chaux sont généralement recommandées pour les «décors» où leur finesse et leur blancheur jouent pleinement leur rôle [11].

Les chaux hydrauliques naturelles (NHL)

Plus utilisées dans la construction, elles sont issues des calcaires siliceux. Elles procurent au mortier, sans ajout, une 1ère prise hydraulique qui sécurise l'ouvrage réalisé, puis une 2ème prise aérienne qui, par décarbonatation au contact de l'air, donnera à l'enduit toute sa patine. Ces chaux normalisées conviennent pour les maçonneries, les enduits et les décors [11].

Les chaux hydrauliques (HL)

Elles ont toutes les caractéristiques des mélanges chaux - ciment pour confectionner des mortiers dits bâtards à l'ancienne, avec l'avantage d'un mélange homogène et régulier de chaux hydraulique naturelle et de ciment réalisé en usine. Ces chaux normalisées conviennent pour la réalisation d'enduits, pour le rejointoiement (pierres dures uniquement) et pour le montage de blocs béton et de briques [11]

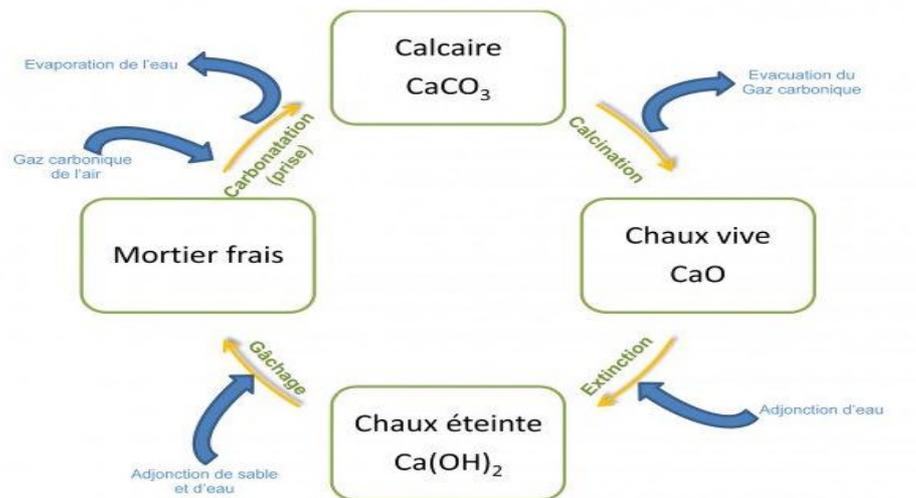


Figure05 : cycle de transformation de la chaux [15]

II.1.1.3 Le plâtre

Le plâtre est issu de la cuisson de blocs de gypse à environ 200 °C. Cette roche cristalline sédimentaire très tendre (entre 1,5 et 2 l'échelle de mohs) se présente sous diverses formes physique : plaquettes, prismes, aiguilles ou agrégats fibreux. Lorsque la roche est compacte à grains blancs et finement cristallisée, elle prend le nom d'albâtre ou albâtre gypseux, pierre réputée pour ses qualités en sculpture [10].

II.1.2 Les charge

Ce sont des composés solides, inertes et insolubles, qui constituent le squelette d'un enduit. Elles se divisent en deux grandes familles :

II.1.2.1 Les granulats

Ce sont les sables couramment utilisés dans les enduits minéraux. Ils participent également à l'aspect final de l'enduit [1].

- **Les sables**

Les sables sont des produits d'érosion des roches que l'on extrait en carrières dans des dépôts sédimentaires ou dans les lits des rivières. Ce sont des sables «roulés» adaptés à la réalisation d'enduits car plus faciles à talocher que le sable concassé. Un bon sable se

reconnaît quand il crisse dans la main, il s'amalgame légèrement quand il est humide [12]. Les sables concassés, eux, sont plutôt destinés à la construction (fabrication de béton, etc.) [12].

Trois familles de sables se distinguent en Algérie [13] :

- Les sables roulés siliceux, dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.
- Les sables de concassage calcaires sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.
- Le sable de dune qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités. Les granulats légers, de faible masse volumique, conduisent à des enduits moins rigides et adaptés aux supports de faible résistance mécanique (ex. vermiculite, billes de verre, etc.) [13].

II.1.2.2 Les fillers

Ce sont des poudres, généralement de nature minérale, utilisées pour modifier certaines propriétés des enduits (maniabilité, perméabilité, capillarité, performances mécaniques, etc.) [1].

II.1.3 L'eau

Il s'agit de l'eau employée pour le gâchage du mortier :

Une partie de l'eau sert à la prise des liants hydrauliques, l'autre partie intervient dans la consistance du mortier frais et s'évapore après l'application [1].

On évite d'utiliser pour le gâchage les eaux croupies des mares, des étangs ou encore des citernes. Rendues acides par la décomposition des matières organiques qu'elles recèlent, elles attaquent les éléments calcaires présents dans le sable ou dans la chaux du mortier et provoquent des efflorescences. Cette acidité, qui peut s'avérer intéressante pour retarder la prise d'un mortier, est contre-indiquée dans le cas d'un enduit à la chaux aérienne dont la prise est déjà très lente. Une eau acide altère par ailleurs les performances de la chaux. La quantité d'eau nécessaire dépend de l'humidité du sable entrant dans le mortier [10].

II.1.4 Les additifs

Ils agissent sur l'enduit de façon temporaire (à l'état frais ou au cours du durcissement) ou permanente (à l'état durci).ils sont répartis en général :

a) Les adjuvants: Leurs rôles et leurs natures sont très variés : rétenteurs d'eau, entraîneurs d'air, plastifiants, régulateurs de prise, agents d'adhérence, hydrofuges, biocides, etc. [1]. Les résines d'adjonctions : ces résines à base de polymères en dispersion aqueuse sont diluées dans l'eau de gâchage du mortier et incorporées au gobetis ou au sous enduit, pour améliorer l'accrochage [1].

b) Les colorants (pigments): Ce sont généralement des oxydes métalliques, voire des terres, ajoutés à l'enduit pour le teinter en masse. Il n'est autorisé que l'utilisation des adjuvants n'ayant aucune action nocive sur le mortier. Les adjuvants ne doivent pas diminuer la résistance ni la durabilité du mortier ni, le cas échéant, la protection contre la corrosion de l'armature de renfort ou du lattis. De plus, les adjuvants ne doivent pas modifier, autrement que dans le sens recherché, la prise ou le durcissement du liant.

Tableau 05 : Effet de type d'adjuvant sur le mortier[19].

Type d'adjuvant	Effet
Colorant	Colore le mortier pour les travaux de finition
Antigel	Favorise la prise du mortier par temps froid
Résine d'accrochage	Sert de fixateur, plastifiant et imperméabilisant
Durcisseur de surface	Améliore la tenue aux huiles et aux graisses, il est anti-poussière
Hydrofuge ou Imperméabilisant	Imperméabilise le mortier
Plastifiant	Donne une consistance plus liquide (sans ajout d'eau) pour faciliter la mise en œuvre

II.2 Réalisation manuelle du mortier

Lorsque les mélanges doivent être réalisés à la main (petite quantité à moyenne), il convient d'effectuer le gâchage sur une base propre, sèche et imperméable selon un mode opératoire semblable à celui-ci :

1. Sur un sol plan, sec et nettoyé ou dans un bac à gâcher (de préférence), faire un tas avec le sable pour le mortier ;
2. Verser au-dessus du tas de sable, le ciment (et/ou) la chaux (en proportion), mélanger en déplaçant 2 fois le tas ;
3. Ouvrir le tas en forme de « volcan » puis verser l'eau. Ramener le mélange vers l'intérieur jusqu'à obtenir une matière homogène.

II.3 Réalisation mécanique du mortier

L'utilisation d'une bétonnière électrique ou thermique offre des avantages :

- Le gain de temps ;
- La possibilité de réaliser un chantier plus important ;
- L'obtention d'un mélange plus homogène du mortier ;

Pour réaliser notre mortier d'enduit avec la bétonnière, nous pouvons suivre la procédure suivante :

1. Verser de l'eau dans la cuve de la bétonnière (capacité de malaxage 90 litres par exemple) et ajouter le sable pour le mortier ;

2. Laisser malaxer quelques minutes. Verser à nouveau l'eau et le ciment ;

3. Rajouter de l'eau nécessaire jusqu'à l'obtention du mélange souhaité pour le mortier ou pour le mortier bâtard.

Chapitre III

Les enduits monocouches

III.1 Définition

Ils se distinguent des enduits traditionnels par leur application en une ou deux passes, avec un produit de même composition, préparé en usine et livré en sacs prêts à gâcher. Dosés avec des méthodes industrialisées, les enduits monocouches présentent la sécurité d'une qualité constante et contrôlée dans le cadre de la procédure d'Avis technique. La composition de ces enduits comporte souvent des charges légères (perlite, vermiculite, ponce) ou des fibres, ainsi que des adjuvants (entraîneurs d'air, hydrofuges) et des rétenteurs d'eau. Ces enduits font l'objet du document élaboré par le CSTB (Cahier N° 1777 de juin 1982).

« Conditions générales d'emploi et de mise en œuvre des enduits d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques ». Leurs performances sont spécifiées par la norme NF EN 998-1[14].

Il existe 2 catégories d'enduit monocouche : « avec des granulats courants et/ou légers».

Un enduit semi-allégé est composé de sables, de liants, d'adjuvants et de charges naturelles légères. Ces charges sont des matières inertes qui allègent l'enduit en remplaçant une partie du sable.



Figure06 : composition des enduits monocouches (lourds et légers).

III.2 Caractéristiques des enduits monocouches

Les mortiers d'enduits n'acquièrent leurs caractéristiques qu'après durcissement complet. Certaines performances des mortiers à l'état frais sont également requises.

Il est rare qu'un même enduit possède toutes les propriétés pour assurer les fonctions du dressage, d'imperméabilisation et de décoration du support. Seuls les enduits monocouches, spécialement formulés à cet effet et fabriqués en usine, peuvent remplir les trois fonctions. Les enduits sont alors exécutés en plusieurs couches, chaque couche assurant partiellement ou complètement une ou deux fonction(s) [1].

❖ Masse volumique

Elle est en fonction de la quantité d'air entraîné qui dépend à la fois :

- ✓ Des conditions de la préparation (quantité d'eau, mode et durée de malaxage, température),
- ✓ Des conditions d'application (matériel de projection et réglage).

Suivant leur domaine d'application, les mortiers industriels présentent les masses volumiques variées, globalement comprise entre 1000 et 2000 kg/m³.

L'enduit est dit léger lorsque sa masse volumique est inférieure à 1300 kg/m³.

Les autres caractéristiques dépendent directement de la masse volumique de l'enduit. En particulier, les caractéristiques mécaniques sont d'autant plus fortes que la masse volumique est élevée.

❖ Résistance mécanique

Suivant la valeur de résistance mécanique en compression du mortier, quatre classes sont définies : CS I, CS II, CS III et CS IV, de la plus faible à la plus élevée.

❖ Adhérence au support

Elle dépend fortement de la préparation du support et des conditions climatiques au cours de l'application et du durcissement de l'enduit. Elle conditionne directement la durabilité de l'enduit. L'adhérence est d'autant plus forte que le mortier est plus dosé en liants.

❖ Absorption d'eau par capillarité

Elle conditionne en partie la fonction d'imperméabilisation, cette fonction dépendant également du nombre de couches et de l'épaisseur d'enduit. Suivant la valeur d'adsorption d'eau du mortier, trois classes de capillarité sont définies : W0 (pour laquelle aucune valeur n'est spécifiée).

W1 (capillarité moyenne).

W2 (capillarité faible).

L'absorption d'eau liquide est indépendante de la perméabilité à la vapeur d'eau. Il est possible qu'un enduit imperméable à l'eau soit perméable à la vapeur. C'est en particulier le cas des enduits d'assainissement R.

❖ Perméabilité à la vapeur d'eau

C'est la propriété de l'enduit de permettre la transmission de la vapeur d'eau de l'intérieur vers l'extérieur de l'ouvrage. Avec une perméabilité suffisante, la vapeur peut traverser la paroi sans risque de condensation à l'interface support-enduit.

❖ **Rétention d'eau**

Elle caractérise l'aptitude d'un mortier industriel frais à conserver sans eau de gâchage une fois appliqué sur le support. Une rétention d'eau élevée permet aux liants hydrauliques de s'hydrater correctement [1].

Trois catégories de rétention d'eau R_e sont distinguées :

Tableau06 : catégories de rétention d'eau des enduits monocouches.

Rétention d'eau	Appréciation
$R_e < 86\%$	Faible
$86\% \leq R_e \leq 94\%$	Moyenne
$R_e > 94\%$	Forte

III.3 Techniques de mise en œuvre des enduits monocouches

L'application est généralement effectuée en une ou deux passes, de préférence espacées de quelques heures, suivant le type de finition désirée. Lorsque la seconde passe ne peut être effectuée dans les 24 heures, il y a lieu, pour assurer son accrochage, de ré humidifier l'enduit de première passe. La première passe de l'enduit doit être serrée (dressage à la règle ou à la taloche) mais non lissée, et il faut respecter l'épaisseur indiquée par le fabricant.

III. 3.1 Préparation du support

De la bonne préparation du support vont dépendre l'adhérence de l'enduit et son aspect final. Les enduits sont appliqués sur des supports de nature très différente : maçonnerie de pierres, de briques ou de blocs de béton, béton branché brut de décoffrage, béton de granulats légers, béton cellulaire, fibres-ciment, bois. Certains supports permettent une application directe, c'est le cas de la brique, des blocs de béton, des maçonneries de pierres. D'autres supports nécessitent un traitement préalable.

Dans tous les cas, le support :

- doit être débarrassé des poussières et des sels éventuels, être sans trace de plâtre (formation de sulfo-aluminate de chaux expansif avec le ciment) ;
- S'il n'est pas assez rugueux, doit être traité brossé et peigné pour permettre un bon accrochage de l'enduit ;
- doit être suffisamment humidifié avant la projection de la première couche d'accrochage (parfois plusieurs humidifications sont à prévoir un jour ou quelques jours à

- l'avance). Cette humidification doit être d'autant plus poussée que l'atmosphère ambiante favorise le séchage (chaleur, vent).

La préparation du support est aussi fonction de l'ancienneté du mur.

a. Les supports neufs:

Les travaux ne doivent être commencés que sur des maçonneries terminées depuis un délai minimum de trois semaines et après mise hors d'eau de la construction. Pour assurer une bonne tenue de l'enduit, il convient de ne l'appliquer que sur des matériaux ayant terminé la plus grosse partie de leur retrait. Pour les surfaces localisées présentant des défauts de planimétrie, il faut prévoir de dresser la surface avec un mortier de composition analogue à la couche d'accrochage, et éventuellement de l'armer.

b. Les supports anciens:

Le mur doit d'abord être débarrassé de toutes traces de revêtements anciens, friables ou non adhérents tels que : enduits, hydrofuges de surface, peintures, etc. Il pourra être nécessaire, dans certains cas (présence de tâches blanchâtres de calcite sur les murs en béton), de procéder à un brossage à la brosse métallique ou à un lavage à l'eau sous pression.

III.3.2 choix de l'enduit

Le choix du type d'enduit à effectuer dépend essentiellement de la nature du support, mais aussi de sa classe de résistance mécanique.

La catégorie (OC1, OC2, ou OC 3) de l'enduit monocouche est déclarée par le fabricant du mortier. L'évaluation de la compatibilité de l'enduit avec le type de support est réalisée selon la norme NF EN 1015.21.

La classe de résistance (Rt2 ou Rt3) est déclarée par le fabricant d'éléments de maçonnerie. Les supports de béton de granulats courants sont Rt 3 [16].

Type de maçonnerie à enduire (exemples)	Catégorie de l'enduit monocouche
 <p>Rt 3 Eléments de résistance à l'arrachement élevée : (Blocs de béton de granulats courants, briques)</p>	OC 3, OC 2, ou OC 1
 <p>Rt 2 Eléments de résistance à l'arrachement moyenne : (Briques, blocs de béton de granulats légers)</p>	OC 2 ou OC 1
 <p>Rt 1 Eléments de résistance à l'arrachement réduite : (Blocs de béton cellulaire autoclavé)</p>	OC 1

Figure 07 : choix de l'enduit selon la nature du support

Le tableau ci-après récapitule le choix d'un enduit le mieux adapté aux différents types de supports selon sa classe de résistance :

Tableau07: choix de l'enduit selon sa classe de résistance [1].

	Classes de résistance de l'enduit			
	CSI	CSII	CSIII	CS IV
Support Rt1	OUI	OUI	NON	NON
Support Rt2	OUI	OUI	OUI	NON
Support Rt3 et béton	OUI	OUI	OUI	OUI

III.4 Matériels et techniques d'exécution

a. Les matériels de travail :

Les outils de mise en œuvre des enduits sont variés mais les plus courants qui permettent de réaliser les différentes couches sont, à de variation d'appellations près, comme :

1. La Truelle : permet de faire la projection manuelle de l'enduit sur la façade ;
2. La Taloche: permet de 'serrer' le corps d'enduit et lui donne l'aspect projeté-écrasé.
3. Le Rouleau mousse alvéolé ou Feuille de chêne : permet de faire une finition tramée.
4. La Règle: en bois ou en aluminium, elle permet de régler l'épaisseur des couches et de dresser l'aspect final de l'enduit ;
5. La Planche à clou ou Gratton : permet de donner à l'enduit l'aspect gratté grâce à sa sous face rendue rugueuse ;
6. La Pierre abrasive ou la Brique de carborundum : permet le ponçage d'un enduit ;
7. La Tyrolienne : permet la projection manuelle du mouchetis sur la façade ;
8. Le pot de projection ou la machine à projeter : permet la projection mécanique de l'enduit sur la façade et lui donne l'aspect de brut de projection.

b. Les techniques d'exécution des couches :

Le mortier frais préparé selon son mode d'emploi est appliqué en 2 passes (frais sur frais) pour assurer l'imperméabilisation des maçonneries, éviter le nuançage d'aspect et l'apparition des spectres des joints de maçonnerie.

La première passe est dressée et serrée, mais non lissée pour permettre un bon accrochage de la seconde. Les épaisseurs de chaque passe dépendent de la planéité de la maçonnerie (soignée ou courante) et des finitions réalisées.

- Le délai entre passes est normalement de quelques heures (ex. l'après-midi ou le lendemain).

La seconde passe est appliquée sans durcissement de la première passe au plus tard 3 jours après [16].

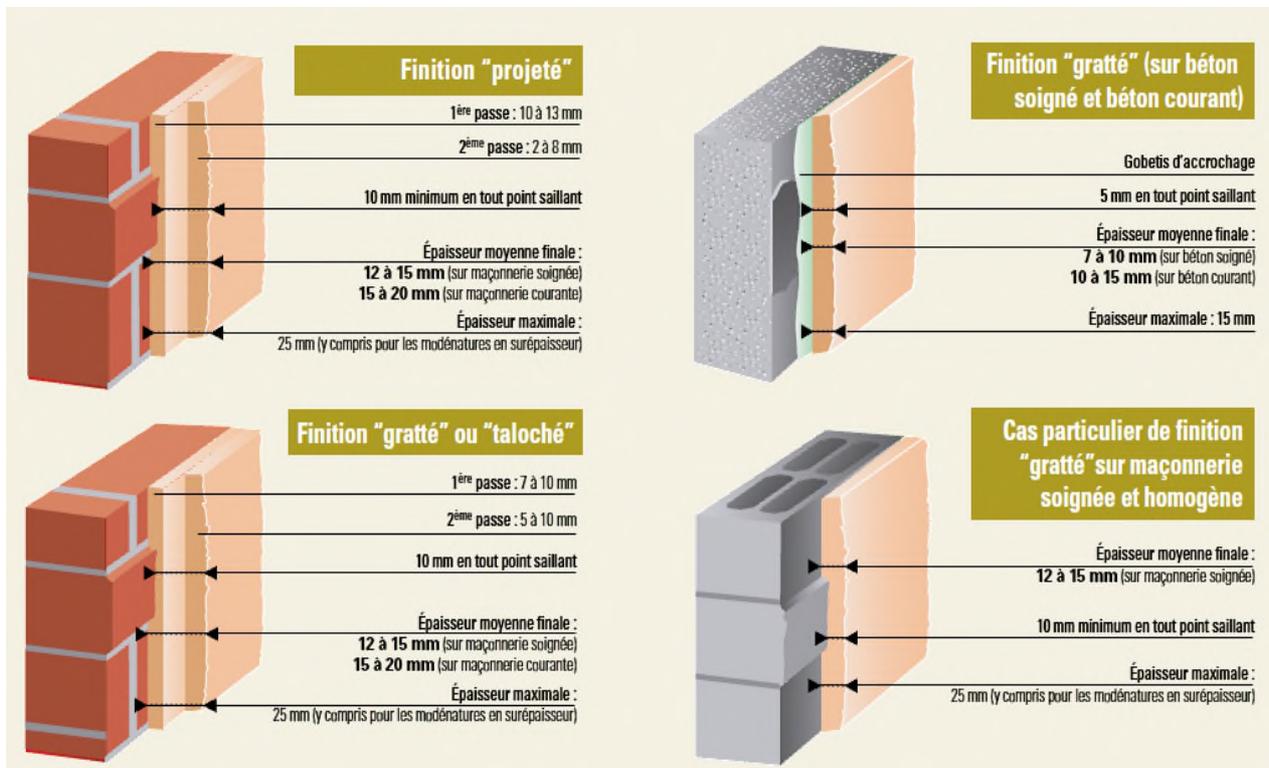


Figure 08 : exemples d'applications et les épaisseurs correspondantes

chapitre IV

Présentation des matériaux étudiés

IV.1 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée d'origine volcanique est extraite du gisement de Bouhamidi situé à 2,5 km de Béni-Saf, dans l'ouest algérien. Ce gisement se présente sous forme d'une montagne appelée El-Kalcoul dont la cote absolue est de 236m (N. Belas et col, 2003).

Cette pouzzolane se trouve en quantités considérables et mérite d'être valorisée. Les pouzzolanes naturelles sont des roches habituellement constituées de scories volcaniques basaltiques. Elles sont essentiellement composées de silice et d'alumine. Elles sont assez largement utilisées en génie civil, principalement à cause de leur faible coût et de leurs propriétés physico-chimiques intéressantes qu'elles peuvent développer dans les matériaux cimentaires. [16]

Cette addition minérale se caractérise par une très forte teneur en silice et en alumine et une finesse de mouture élevée par rapport à celle du ciment utilisé et de fillers calcaires.

Tableau 08 Caractéristique physiques de la pouzzolane naturelle (N. Belas et al, 2003) [16]

Masse volumique apparente (g/cm^3)	0,95
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,85
Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	4500

Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence d'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.

IV.1.1 Composition chimique de la pouzzolane :

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques moyennes de la pouzzolane naturelle issue du gisement de Bouhamidi, sont effectuées au laboratoire de la cimenterie de Zahana. [17]

Élément (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO libre(%)	P.F(%)
Pouzzolane	45.21	17.85	9.84	9.99	4.38	/	/	/	/	3.91

Tableau 9 : Analyse chimique de la Pouzzolane [Laboratoire de chimie de la S.CI. ZAHANA] [17]

Les avantages de l'ajout partiel de la pouzzolane sur les mortiers sont divers. Elle participe au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage. Elle permet de réduire la quantité de ciment utilisée dans la composition du mortier.

Les mortiers aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec les charges minérales et les liants hydrauliques. [17]



Figure 9: Pouzzolane brute de Bouhamidi

La pouzzolane est utilisée essentiellement comme ajout à la fabrication des ciments.

En Algérie, la production de pouzzolane pour l'année 2007 s'élève à 570000 tonnes, en accroissement de +24 % par rapport à celle réalisée en 2006. [18]

Elle est produite par deux entreprises publiques à savoir :

La Société de Pouzzolane et des Matériaux de Construction (SPMC), filiale du groupe FERPHOS, qui a produit en 2006 à partir de son gisement de Rokbet El Hassi commune de Béni Saf (W.Ain Temouchent) 452 000 tonnes. [18]

La Société des Ciments de Benisaf (S.CI.BS), rattachée au groupe ERCO, qui a produit à partir de son gisement Ghar Ben Baricou commune d'Ain Kihel (W.Ain T'émouchent) 118 061 tonnes pour satisfaire ses propres besoins. [18]

La production de la pouzzolane a enregistré son taux le plus faible en 2001 avec 362 000 tonnes, et le plus durant l'exercice 2007 avec 570 000 tonnes, soit une augmentation de 49% par rapport à l'année 2000. [18]

IV.1.2 Types de pouzzolanes :

- Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux qui peuvent être calcinés dans un four ou transformés, puis broyés pour obtenir une fine poudre. Les variétés de pouzzolanes naturelles les plus utilisées en Algérie (nord ouest du pays) comprennent l'argile calcinée, le

schiste calciné et le métakaolin.

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Bouhamidi (Béni-Saf).[17]

- Pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue soit des résidus de fabrication industrielle tel que le mach fers, cendre de bois, soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argiles pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite. [17]

IV.1.3. Effet de La pouzzolane :

La pouzzolane confère aux mortiers les propriétés suivantes :

-A l'état frais :

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, Cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

-A l'état durci :

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces.
- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces.

IV.1.4. Propriété de la pouzzolane

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

- Propriétés hydrauliques

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.

- Propriétés physiques de remplissage

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité

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 depuis de nombreux siècles.

IV.1.5. Caractéristiques techniques de la pouzzolane

- **Teneur en eau naturelle** : Par rapport aux autres roches naturelles, la teneur en eau de la pouzzolane est élevée et peut varier en 8 à 13 % suivant l'état hygrométrique ambiant.

- **Porosité** : La pouzzolane peut varier de 30 à 60 % en volume suivant les granulométries. Contrairement aux agrégats lourds, ce sont les gros éléments qui possèdent le coefficient de porosité le plus important.

- **Légèreté** : La pouzzolane a une faible densité du fait de la proportion de vide [16]

Masse volumique apparente (g/cm^3)	0,95
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,85

- **Capacité d'absorption d'eau** : Les essais d'absorption d'eau à 24 h montrent que la texture cellulaire et la porosité de la pouzzolane lui confèrent une grande capacité d'absorption qui peut varier de 20 à 30 % en poids du granulat sec.

- **Résistance à la chaleur** : La température de fusion de la pouzzolane est de 1140°C mais sa mauvaise conductibilité est telle qu'un élément de 0.150 m d'épaisseur exposé sur une face 8 heures à cette chaleur présente sur la face opposée une température d'environ 100°C seulement. La face exposée se vitrifie.

Notons enfin que dans le domaine du bâtiment, la pouzzolane comporte les avantages suivants :

- . Qualité drainante,
- . Légèreté,
- . Isolation thermique et phonique,
- . Facilité de mise en place,
- . Résistance au gel et au dégel : durabilité.

IV.2 La bentonite

IV.2.1 Définition :

La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou légèrement jaune. Elle se caractérise par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement.

IV.2.2 Origine de la bentonite:

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France) [20].

IV.2.3 Application de la bentonite :

Les bentonites ont de larges applications dans différents domaines (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres décolorantes, ..., etc.). La majeure partie de la bentonite exploitée dans le monde est utilisée comme liant du sable de moulage, dans l'industrie de la fonderie et aussi pour épaissir les fluides de forage [21-22-23].

IV.2.4 Structure de la bentonite :

La montmorillonite (Figure N°01) est le constituant principal de la bentonite. C'est un phyllosilicate (famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH_4^+ et Na^+) situés principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et garde une certaine mobilité.

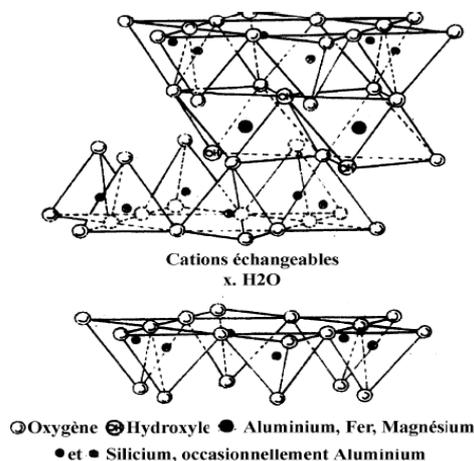


Figure 10: Structure de la montmorillonite [24].

IV.2.5 La bentonite en Algérie :

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent à l'ouest algérien. On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'sila) avec des réserves de deux millions de tonnes [25].

La bentonite de Maghnia est caractérisée par une surface spécifique de $80 \text{ m}^2/\text{g}$, un pH légèrement acide (6,2) et une composition diversifiée en oxydes avec la prédominance de SiO_2 et Al_2O_3 comme le montre le tableau suivant :

Tableau 10 : Composition chimique de la bentonite de Maghnia.

Constituants		%
1	SiO_2	69.4
2	Al_2O_3	14.7
3	Fe_2O_3	1.2
4	CaO	0.3
5	MgO	1.1
6	Na_2O	0.5
7	K_2O	0.8
8	MnO_2	0.2
9	As	0.05

IV.3 Le tuf :

IV.3.1 Historique :

Les hypothèses avancées pour expliquer la genèse de ces formations dépendent de la spécialité de l'auteur.

Renou, en 1848, décrit pour la première fois la « croûte » (calcaire) comme étant un « enduit de surface qui recouvre tous les terrains indistinctement, surtout les terrains d'eau douce et les poudingues et qui suit toutes les ondulations de la surface ; il n'y a rien de géologique et le mécanisme de sa formation me paraît difficile jusqu'à présent à bien expliquer ». [26]

Ludovic, en 1852, définit cette formation calcaire comme étant « un immense linceul blanc qui recouvre une grande partie de l'Algérie ». Depuis le terme croûte (ou encroûtements) fût étendu à toute formation blanchâtre rencontrée à faible profondeur dans le sol. [26]

Une définition plus élaborée est donnée par le géologue Moret (Moret, 1962) «Les tufs volcaniques sont des produits de projections volcaniques, lapillis ou cendres, stratifiés par l'action de l'eau». «Les tufs sédimentaires sont des incrustations irrégulières et spongieuses qui se produisent à l'émergence de sources calcaires et qui renferment de nombreux moulages de plantes et de coquilles. Lorsque ces sources s'épanchent dans un bassin lacustre, le calcaire précipite en une fine poudre cristalline qui se stratifie, en couches régulières. La roche est alors plus compacte qu'un tuf et prend le nom de travertin».

Le Dictionnaire HACHETTE, encyclopédique illustré (1997), définissent les tufs comme : «Roche non homogène poreuse, souvent pulvérulente, soit d'origine sédimentaire (tuf calcaire), soit d'origine éruptive (tuf volcanique), agrégat qu'on trouve sous forme de strates grossières, souvent sous une mince couche de terre ».

En Afrique du Nord le problème est plus complexe. Les formations appelées, dans le langage courant tufs, sont en vérité des encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes, vraisemblablement sous l'influence du mot arabe taffeza articulé teuf en abrégé, qui désigne les grès friables quel que soit le ciment et peut-être aussi du mot berbère tifkert qui signifie : tartre, croûte (De Os Horta, 1979). [26]

IV.3.1 Définitions des tufs

Dans la bibliographie, les tufs se définissent comme étant des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleur claire. Elles datent du Quaternaire et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation. Suivant leur composition chimique,

Le tuf est un minéral constitué par les dépôts successifs de cendres volcaniques ou de calcaire. Le tuf est une roche poreuse et friable, à ne pas confondre avec le calcaire du même nom comportant du mica et du quartz, qui est employé dans certaines régions pour la construction des maisons. [26]

IV.3.2 Types de tuf :

a- Tuf volcanique :

Un tuf volcanique est une roche généralement tendre, résultant de la consolidation de débris volcaniques, généralement de taille inférieure à quatre millimètres, sous l'action de l'eau. Dans le cas de strates de cendre volcanique consolidées de la même manière, on parle de cinérite1.

Pour son abondance et la facilité de son extraction et de sa taille, le tuf est, au moins depuis les Étrusques et les Romains, un des matériaux les plus employés dans la construction de bâtiments publics et privés, dans de nombreuses régions d'Italie.

La texture de cette pierre, qui est assez résistante, approche de celle de la pierre ponce. À toutes les époques de Rome elle a été fort employée dans les constructions et en blocs de dimensions diverses [26]

b- Les tufs calcaires :

Les tufs calcaires existent dans la plus part des pays du bassin méditerranéen et occupent les zones à climat sec. L'abondance de cette ressource naturelle, fait que leur utilisation comme matériau routier est devenue de plus en plus répandue.

Parmi toutes les définitions proposées, on peut retenir celle donnée par :

- Goudie (Goudie, 1988): « La croûte calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium.

Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus au moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration ».

- D'après certains résultats (Hamrouni, 1975 ; De Os Horta , 1979 ; Alloul,1981) : « Les tufs calcaires sont des roches calcaires ayant un Los Angeles supérieur à 60, une masse volumique inférieure à 20 kN/m³, une résistance à la compression simple comprise entre 5 et 10MPa, et dont la teneur en éléments fins passant au tamis de 80 microns, obtenus sur la fraction 0/20 du matériau après extraction, est de l'ordre de 10 à 40 % ».

Les tufs calcaires constituent une ressource en matériaux particulièrement intéressante et économique pour de nombreux pays à climat aride ou semi-aride au relief relativement plat. Ils sont, en général, largement utilisés en technique routière dans un certain nombre de pays comme l'Algérie, la Tunisie, la Colombie, l'Argentine,...etc.

Le travertin comme on le surnomme est une roche sédimentaire calcaire continentale biogénique (construite par des organismes vivants ; on parle de biolithogénèse), grossièrement litée, parfois concrétionnée, de couleur blanche quand elle est pure, ou tirant vers le gris, le jaunâtre, le rougeâtre ou le brun, selon les impuretés qu'elle renferme. La roche est caractérisée par de petites cavités (vacuoles) inégalement réparties. [26]

Les travertins actuels contiennent de l'aragonite qui recristallise rapidement en calcite.

Selon J Curie, le mot travertin désigne la roche produite en condition thermale (eau naturellement réchauffée), alors que le tuf calcaire désigne la roche produite dans une eau froide.

Le travertin se forme aux émergences de certaines sources ou cours d'eau à petites cascades, par précipitation/cristallisation de carbonates à partir d'eaux sursaturées en ions

Ca²⁺ et HCO³⁻. Cette cristallisation n'est généralement pas spontanée. Elle résulte des effets conjugués

- d'une chute rapide de la pression partielle de CO₂ de l'eau ;
- d'une hausse de la température ambiante ;
- d'une augmentation de l'oxygénation ;
- de la turbulence des eaux ;
- d'algues (ex : *Phormidium*, *Schizothrix*), éventuellement au milieu d'une zone de bryophytes ;
- des hépatices, qui comme les mousses peuvent s'encroûter ;
- de champignons, sous forme de filaments mycéliens (ils sont présents dans la plupart des travertins composés à partir d'algues) et - rarement - ils abritent des lichens ;
- de bactéries (cyanophycées généralement) ;
de bryophytes (Les roches fabriquées par des bryophytes sont parfois dites bryolithes).

La végétation repousse de manière continue sur la structure au fur et à mesure qu'elle se calcifie et meurt. Au sein de la roche qui se forme, la nécromasse se décompose progressivement pour ne pratiquement laisser que la matrice minérale. Ce cycle est entretenu tant qu'un apport d'eau sursaturée en carbonate se poursuit et que les algues et bryophytes croissent plus rapidement que le travertin ne se forme.

Le travertin est très fin quand il s'est formé en présence de biocénoses d'algues fines et/ou de bactéries encroûtantes.

Il est au contraire grossier, poreux et riche en microcavités s'il est plutôt produit sur des tapis épais de mousses. Les algues peuvent coloniser des mousses et il en résulte un faciès intermédiaire. Dans les travertins grossiers, se trouvent parfois aussi des feuilles ou branches ou racines fossilisées.

Il existe de nombreux sites de dépôts tuffiers « néogènes » où l'on peut observer le phénomène de production de la roche. En zone tempérée, les bryophytes croissent relativement lentement (1 à 4 mm/an pour *Cratoneuron commutatum* var. *commutatum* ; 2 à 3 mm/an pour *Eucladium verticillatum*, 1 à 3 mm/an pour *Gymnostomum recurvostrium* ; mais jusqu'à environ 30 mm pour *Rhynchostegium riparioides* selon A. Pentecost. [26]

Le travertin peut prendre la forme de marches d'escalier, de barrages, de vasques, etc.

Un barrage de castor peut y contribuer, comme dans le cas étudié par Geurts et al. dans le bassin de la Coal River

Si les eaux sont hydrothermales, en région froide, la biominéralisation continue à se produire activement en hiver.

Les bassins et biohermes¹² qui existent sur certains sites actifs ne sont pas dus à la dissolution, mais à une bioconstruction et élévation continue de leurs parois par des communautés de mousses, bactéries et algues.

Utilisations

« C'est une roche calcaire blanchâtre tirant sur le jaune et donnant des blocs de la plus grande dimension : son grain est très-fin, mais elle est persillée. Au sortir de la carrière elle est tendre, et devient ensuite fort dure ; sa ténacité la rend capable de supporter sans se rompre une charge considérable (...) Il est vrai qu'elle éclate au feu, mais elle résiste à toutes les intempéries de l'air. Enfin, elle acquiert avec le temps un ton chaud et coloré d'un aspect fort agréable. »

« Le travertin est un dépôt calcaire d'eau douce, mais il n'est pas disposé en bancs d'une épaisseur uniforme : sa hauteur varie, au contraire, pour chaque bloc ; ce qui, afin de ménager la pierre, oblige à faire des raccordements. L'inconvénient d'avoir des assises non réglées diminue au reste pour le travertin, parce que les nuances des divers morceaux diffèrent infiniment peu entre elles. La plupart étant d'ailleurs posés sans mortier ou avec un mortier composé de sable très-fin, les joints sont peu sensibles et l'irrégularité s'aperçoit à peine¹. »

On l'utilise aussi en dallage, escalier ou plateaux divers et variés (table, buffet...). À l'extérieur, il sert de margelle aux piscines ou de revêtement de terrasse. On le pose brut de sciage ou vieilli, sans rebouchage des cavités, contrairement à l'intérieur, où il est poli ou adouci et rebouché, pour la commodité de l'entretien.

Etude expérimentale

Chapitre V Étude expérimentale

V.1 Introduction

Dans cette partie, nous avons défini l'importance des essais appliqués sur le mortier dans toutes les étapes, pour connaître l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés physico-chimique, le comportement mécanique et sur la durabilité des mortiers confectionnés à base de la bentonite, de tuf et de la pouzzolane.

Ce travail expérimental étudie les avantages et la possibilité de substitution partielle de la charge par ajout pouzzolanique et argile dans le mortier. Cette étude expérimentale consiste à préparer un mortier avec addition minérale en remplaçant un certain pourcentage de charge par les ajouts site ci-dessus substitué à divers pourcentages (0%, 3%, 6%, 9% et 12%). Dans cette étude, nous avons fait varier le pourcentage de l'ajout dans le mortier par la méthode de substitution (remplacement partiel de la charge par la pouzzolane, le tuf et la bentonite) afin d'étudier son effet sur les propriétés physico-chimiques et le comportement mécanique du mortier confectionné.

Cette partie est consacrée essentiellement à la présentation de la technique d'élaboration du nouvel enduit composite, de la confection des éprouvettes, ainsi que la description des protocoles expérimentaux.

Des essais physiques et mécaniques ont été effectués au sein des laboratoires suivants :

- Laboratoire de la *Sarl Mortero* de Bejaia.
- Laboratoire de Génie Civil et Travaux Publics LGCTP
- Laboratoire L.T.P.Est de Bejaia.
- Laboratoire Universitaire de département de Génie Civil de l'université de Bejaia.
- Laboratoire Universitaire de département de chimie industrielle de l'université de Bejaia.

L'étude expérimentale, faite au sein des laboratoires cités ci-dessus, a pour but d'évaluer quelques indicateurs de qualité et de durabilité des mortiers d'enduit réalisés. Les indicateurs retenus pour cette étude sont : la performance mécanique et les propriétés physiques et chimiques de l'enduit. Ainsi, dans cette partie, après une brève description de la *Sarl Mortero*, nous décrivons la méthodologie d'étude et les résultats des tests réalisés feront l'objet d'interprétation pour la caractérisation des enduits réalisés.

V.2 Présentation de la *Sarl Mortero*

V.2.1. Historique :

La *Sarl Mortero* est une entreprise algérienne détenue à 100% par le groupe *Ceramica Madaoui*, elle est franchisée sous le label *Parexlanko* (une marque commerciale de *Parex Group* présent dans plus de 70 pays dans le monde avec 54 unités de production). Le groupe *Ceramica Madaoui* est présent dans le secteur du bâtiment, à travers 21 ans d'existence, il

s'est adapté au marché en commençant par la distribution, puis la réalisation, la promotion immobilière, et enfin la production.

Après une étude de marché bien précise en collaboration avec *Parex Group*, les deux entités décident de signer une convention pour préparer, développer et lancer les mortiers secs en Algérie. L'unité de production, située à Bejaia est rentrée en production en mars 2012 avec deux produits, aujourd'hui elle en compte huit.

V.2.3 Présentation des produits :

Mortero compte aujourd'hui plus de 14 formulations, dont 10 déjà commercialisées qui sont réparties en quatre gammes :

Les mortiers Colle : Les colles se présentent exclusivement en poudre blanche par mesures d'excellence, sous conditionnement de 25kg.

Le mortier colle C0 (Lanko Standard 509) : Colle basique convient pour les carreaux de très forte porosité (pâte rouge, céramique, terre cuite)

Le mortier colle C1 (Lanko Super 511) : Colle amélioré convient aux carreaux de porosité moyenne (certains grès cérame, Compacto, porcelaine, patte blanche), utilisable en intérieur et petites surfaces extérieures.

Ce mortier est compatible avec les parois de plaque de plâtre et les supports bétons.

Le mortier colle C2 (Lanko Extra 522) : Colle flexible convient à tous types de carreaux, supports très peu absorbants, grands passages, bassins et piscines, terrasses, administrations, façades. Contient de la résine plastifiante.

Le mortier colle C2S (Lanko Maxi 571) : Colle extra flexible convient à tous types de carreaux, supports fermés, très haute résistance à la compression, adhérence maximale, résistance à la chaleur accrue. Cette colle est 16 fois plus puissante qu'une colle basique.

Les mortiers joints : On distingue deux types: le joint sol et le joint mur et piscines, avec 6 colories, conditionnés en sacheries de 2,5 et 5 Kg.

Le mortier joint spécial sol (Lanko Sol 542) : Le joint sol est fabriqué à base de grains moyens sélectionnés pour résister à la charge, aux joints larges atteignant 15 mm et aux frottements.

Le mortier joint spécial mur et piscines (Lanko Mur 543) : Le joint mur et piscines est fabriqué à base de grains fins pour une finition soignée, contient une résine qui le rend imperméable, résiste en milieux très humides.

- **Le sous enduit :**

Le sous enduit (mortier de crépissage) : Le sous enduit est un mortier de ragréage mural, destiné à égaliser les supports muraux en brique, parpaings, pierres et bétons.

Le sous enduit est une première couche destinée à accueillir une finition par-dessus, applicable à la main comme en machine, plus résistant et plus homogène qu'un enduit traditionnel. Il confère également une meilleure finition.

- **Les enduits monocouches** : Les enduits monocouches d'imperméabilisation et décoration façades, ces enduits servent à protéger et décorer les parois extérieures.

Les supports admissibles sont les briques, les parpaings, les pierres, les moellons, les sous enduit et le béton. Disponible en 48 teintes, ce produit est teinté dans la masse.

- **Lankolite**

Le *Lankolite* est un hydrofuge de masse en poudre qui imperméabilise les mortiers et bétons, et limite la formation d'efflorescence et de salpêtre. Il diminue considérablement la porosité des mortiers et bétons par réduction de la capillarité, la rendant étanche dans la masse, il est compatible avec tous les types de ciment (sauf ciment alumineux) et avec la chaux pour les mortiers batards.

V.3 Méthodologie d'étude

V.3.1 Choix des matériaux

L'objectif de cette partie est de chercher l'impacte du filler sur les caractéristiques du mortier normal de référence réalisé et testé également. C'est dans cette optique que la bentonite, le tuf et la pouzzolane, réputées être des matériaux, très abondants, légers et dans la composition chimique presque la même que celle du clinker, ont été choisis pour être testés. D'autre part leurs utilisations ont pour objectif de réduire la consommation de clinker, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

Les éléments utilisés sont donc le ciment, la chaux, le sable fin et moyen (80µm à 2mm), l'eau, quelques adjuvants comme l'éther cellulosique, la bentonite, le tuf et la pouzzolane.

V.3.2 Composition des mélanges à réaliser

Pour 3Kg d'enduit, les mélanges à réaliser pour les essais sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Ils sont préparés et mélangés conformément à l'EN 1937. Les proportions utilisées sont obtenues en se basant sur les proportions utilisées à la chez *Mortero* pour la réalisation d'un sac d'enduit monocouche de 25 Kg.

Tableau 11 : Quantités de matériaux pour l'enduit référence MR

Mélange	Matériaux					
	Sable (par granulométrie et en g)			Ciment (g)	Chaux (g)	Adjuvant (g)
	<100 μm	100 à 400 μm	500 à 1600 μm			
MR	538,8	1790,7	160	350	150	10,5

Tableau 12: Quantités de matériaux pour l'enduit à base de bentonite Mb

Mélange	Matériaux						
	Bentonite (g)	Sable (par granulométrie et en g)			Ciment (g)	Chaux (g)	Adjuvant (g)
		<100 μm	100 à 400 μm	500 à 1600 μm			
Mb 3%	90	448,8	1790,7	160	350	150	10,50
Mb 6%	180	358,8					
Mb9%	270	268,8					
Mb12%	360	178,8					

Tableau 13: Quantités de matériaux pour l'enduit à base de tuf Mt

Mélange	Matériaux						
	Tuf (g)	Sable (par granulométrie et en g)			Ciment (g)	Chaux(g)	Adjuvant (g)
		<100 μm	100 à 400 μm	500 à 1600 μm			
Mt 3%	90	448,8	1790,7	160	350	150	10,50
Mt 6%	180	358,8					
Mt 9%	270	268,8					
Mt 12%	360	178,8					

Tableau 14: Quantités de matériaux pour l'enduit à base de pouzzolane Mpz

Mélange	Matériaux						
	Pouzzolane (g)	Sable (par granulométrie et en g)			Ciment (g)	Chaux(g)	Adjuvant(g)
		<100 μm	100 à 400 μm	500 à 1600 μm			
Mpz 3%	90	448,8	1790,7	160	350	150	10,50
Mpz 6%	180	358,8					
Mpz 9%	270	268,8					
Mpz 12%	360	178,8					

V.4 Protocoles expérimentaux

Dans cette partie nous allons expliquer les différentes méthodes et essais réalisés durant notre étude.

V.4.1 Confection et conditions de conservation des éprouvettes

Après le malaxage, on remplit les moules à raison de deux couches et on vibre le mortier à l'aide d'une tige pour assurer sa bonne distribution, et enfin on arase et on lisse la surface du mortier. Les éprouvettes sont confectionnées et placées dans le laboratoire à l'air libre. Après 24 heures, ces dernières sont démoulées et laissées à l'air libre à une température de 25°C jusqu'au moment de l'essai. Cette procédure est reproduite pour toutes les compositions et pour tous les essais.

Ces éprouvettes, de dimensions (4 X4 X 16) cm³, sont utilisées pour les essais suivants:

- Détermination de la masse volumique
- Absorption d'eau par capillarité
- La résistance à la compression

V.4.2 Détermination de la masse volumique

La masse volumique du mortier durci ρ est déterminée, pour les différents mortiers confectionnés, conformément à la norme *NF EN 12390-7*

- Peser la masse M d'un échantillon durci contenu dans l'éprouvette.
- La masse volumique est obtenue en divisant la masse par le volume correspondant aux dimensions de fabrication. La masse volumique du mortier durci ρ sera :

$$\rho = M/V(\text{en Kg/m}^3) \quad V: \text{volume de l'éprouvette}$$

V.4.3 Essai de consistance

L'essai, qui a été effectué selon la norme *EN 193-6*, a pour but de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour gâcher l'enduit et obtenir une pâte normalisée.

a) Matériel utilisé

- Salle climatisée: L'essai doit se dérouler dans une salle, dont la température est de 20°C±1°C et dont l'humidité relative est supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra, entre deux mesures, être entreposé dans de l'eau maintenue à 20°C±1°C,
- Malaxeur normalisé : avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant tourner à 2 vitesses (dites lente 140 tr/mn et rapide 285 tr/mn),

- Appareil de *Vicat* (du nom de son inventeur). L'appareil est composé d'un moule tronconique ($h=40\text{mm}$ $d_1= 70 \text{ mm}$ et $d_2= 80 \text{ mm}$) et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde de $\Phi = 10 \text{ mm}$,
- Balance précise à 0,1 g près,
- Chronomètre précis à 0,1 s près.

b) Mode opératoire

On procède par tâtonnements :

- préparer 1 kg de mortier frais. Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le mortier frais,
- mettre le malaxeur en marche et déclencher le chronomètre pour 5 minutes.
- la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de VICAT.
- la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- la pâte sera à consistance normale si $d= 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$:

$Sid > 7 \text{ mm}$: il n'y a pas assez d'eau,

$Sid < 5 \text{ mm}$: il y a trop d'eau.

Le taux de gâchages T_g est ainsi exprimé par la relation suivante :

$$T_g = \frac{\text{massede l'eau}}{\text{masse du mortier frais}} \times 100 \dots\dots\dots (\%)$$

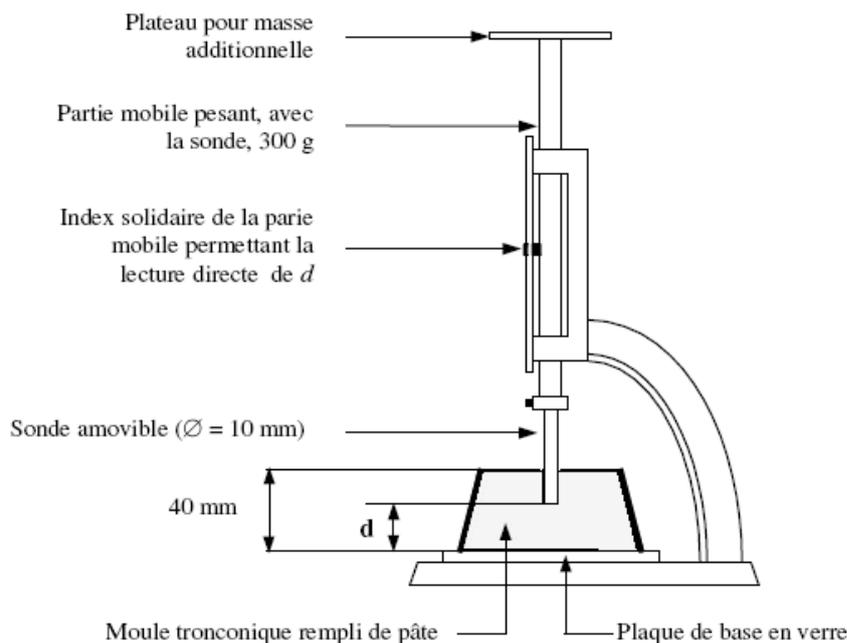


Figure 11 : Appareil de Vicat

V.4.4 Essai de rétention d'eau

Cet essai nous permet de déterminer la capacité d'un produit gâché à conserver son eau par aspiration. Il est réalisé selon la norme *ASTM C110*.

a) Description de l'appareillage : L'appareillage comprend :

- Un disque perforé sur lequel on étale le mortier,
- Une pompe à vide pour aspirer l'eau du mortier,
- Un manomètre rempli de mercure pour mesurer la dépression,
- Un ensemble de verrerie : flacon, entonnoir, éprouvette,
- Des bouchons, des connecteurs en T et un flexible pour relier les différents éléments.

- 1 : Dispositif permettant de créer un appel d'air pour retirer la coupelle
 2 : Prise d'air permettant de régler le niveau de mercure
 3 : Pompe à vide
 4 : Manomètre

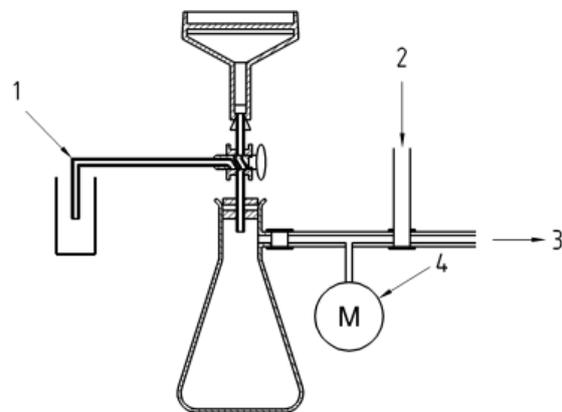


Figure 12 : Dispositif d'aspiration d'eau sous dépression

b) Mode opératoire

La coupelle est munie d'un papier filtre (\varnothing 15 mm, 60 g/m²) au préalable humidifié et essoré par application d'un filtre sec. Elle est remplie de mortier frais, à l'état de pâte, arasée puis pesée avant essai. Connaissant le poids de la coupelle vide avec le filtre humide, on en déduit la masse de mortier gâché mis en place et le poids (E) d'eau de gâchage correspondant en grammes (g).

c) Mesure et calcul

La mesure est effectuée dans les 10 minutes après le gâchage du mortier et en tenant compte du temps de repos préconisé par le fabricant de mortier. Au bout de 15 minutes à partir du début du gâchage, l'appareillage est mis sous dépression pendant 15 minutes. La coupelle est ensuite pesée après essuyage de sa sous-face. On calcule par différence la perte d'eau (e) en grammes (g). La rétention d'eau (Re) est exprimée en % du poids d'eau de gâchage initial.

$$Re = \frac{E-e}{E} \times 100 \dots\dots (\%)$$

V.4.5 Absorption d'eau par capillarité

Les éprouvettes destinées aux essais de capillarité

- Mise en place préalable d'un papier filtre au fond du moule métallique avant remplissage de l'enduit à tester ;
- Coulage de l'enduit dans le moule métallique, tassé par le choc ;
- Arasement de l'excédent d'enduit en surface du moule ;
- Mise on place d'un papier filte a la surface de l'enduit ;
- délais du séchage ;
- 2 jour dans le moule à $23^{\circ}\text{c} \pm 2$ et $95\% \pm 5$ HR ;
- Démoulage, puis conservation 5 jours à $23^{\circ}\text{c} \pm 2$ et $95\% \pm 5$ HR

L'essai est effectué à température « régulée » du laboratoire, sur trois demi-prismes (éprouvettes 4 x 4 x 16 cm après) conformément à la norme NF EN1015-18 - *Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci*.

Les éprouvettes sont immergées par leur base de telle manière à ce qu'elles ne touchent pas le fond du récipient et qu'elles soient immergées dans de l'eau, sur une hauteur d'eau de 5 à 10 mm au-dessus de cette base.

A cet instant, le chronomètre est déclenché et le niveau d'eau est maintenu constant pendant tout l'essai. Après 10 minutes, les éprouvettes sont retirées du récipient et essuyées brièvement avec un chiffon humide. Elles sont pesées M1 et replacées dans le récipient. Après 90 minutes, l'opération est répétée et les éprouvettes sont pesées à nouveau M2.

Le coefficient de capillarité W est égal à la valeur moyenne, exprimée en grammes, de la reprise de poids de chaque éprouvette entre 10 et 90 minutes :

$$W = 0,1 (M2 - M1) \dots\dots\dots \text{ en kg/ (m}^2\text{.min}^{1/2}\text{)}$$

V.4.6 Résistance à la compression

Les essais sont effectués selon la norme *NF EN 1015-11* les éprouvettes ont été rompus en compression au moyen de la presse d'écrasement. La résistance est calculée selon la formule :

$$R_c = F_c / S \quad \text{avec } S = b^2$$

R_c: Résistance à la compression

F_c: La force appliquée

S : la surface sur laquelle la force est appliquée

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si F_c est exprimée en Newton, b = 40 mm, cette résistance exprimée en Méga pascals vaut :

$$R_c \text{ (MPa)} = F_c \text{ (N)} / 1600$$

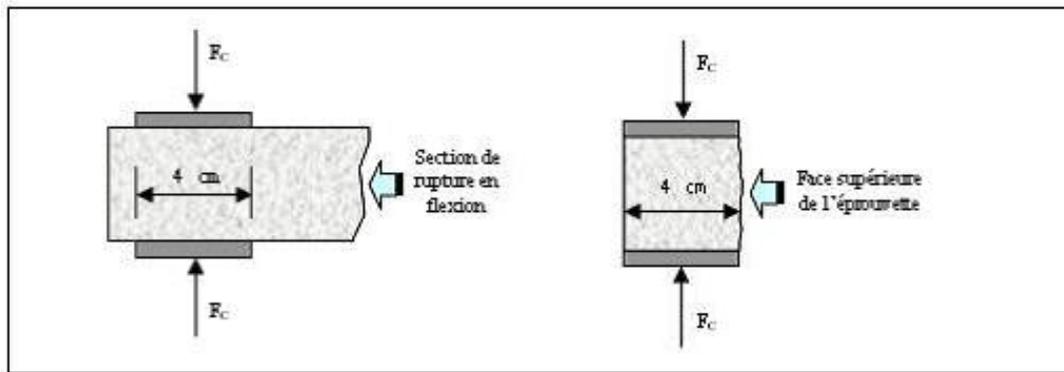


Figure 13 : Dispositif de rupture en compression

A la partie suivante, les résultats des essais effectués sur les différents mortiers et éprouvettes de mortier ainsi réalisés, en l'occurrence, mortier référence (témoin), mortier avec la pouzzolane, mortier avec la bentonite et mortier avec le tuf pour différents pourcentages de substitution, seront présentés et discutés.

V.4.7 Spectroscopie IRTF

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IR-FT) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet à travers la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques d'effectuer l'identification des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Sous l'action d'une radiation lumineuse (dont l'énergie est liée à sa fréquence), une molécule peut passer d'un état d'énergie E_1 vers un état d'énergie supérieure E_2 . Les radiations infrarouges de fréquences (nombre d'ondes) comprises entre $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ sont absorbées par une molécule affectant l'énergie de vibration des liaisons de ces molécules.

Toutes les vibrations ne donnent pas lieu à une absorption, cela va dépendre aussi de la géométrie de la molécule et en particulier de sa symétrie. Pour une géométrie donnée on peut déterminer les modes de vibration actifs en infrarouge grâce à la théorie des groupes. La position de ces bandes d'absorption va dépendre, en particulier, de la différence d'électro-négativité des atomes et de leur masse.

Par conséquent, à un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau :

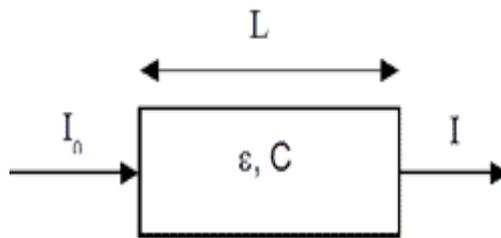
- **Qualitativement** : Les longueurs d'onde que l'échantillon absorbe, sont caractéristiques des groupes chimiques présents dans le matériau analysé.

Des tables permettant d'attribuer les absorptions aux différents groupes chimiques présents.

- **Quantitativement** : L'intensité de l'absorption, à la longueur d'onde caractéristique, est reliée à la concentration du groupe chimique responsable de l'absorption par la relation de Beer-Lambert [24].

Lois de Beer-Lambert :

L'atténuation d'un rayonnement monochromatique est reliée au nombre de molécules absorbantes le long d'un trajet optique :



$$A = \epsilon \cdot l \cdot c = I_0/I$$

A : absorbance (sans unité)

ϵ : coefficient d'absorption moléculaire ou coefficient d'extinction molaire ($l \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{Cm}^{-1}$ ou $\text{Cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$)

l : trajet optique (Cm)

C : concentration de la substance dans la solution ($\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$)



Figure 14: L'appareil IR Affinity-1 utilisé pour l'analyse IRTF.

V.4.8 Caractérisation morphologique par le M.E.B.

La technique de caractérisation morphologique à l'aide de la microscopie électronique à balayage est utilisée dans beaucoup de laboratoires dans des variétés de recherches car elle nous fournit des idées importantes et claires sur la morphologie des couches étudiées plus d'autres informations que nous pouvons les tirer à l'aide de cette méthode.

Le microscope à balayage fournit une image reconstituée : une sonde « ponctuelle » excite l'échantillon et l'explore en le balayant ligne après ligne, et une panoplie de détecteurs

permet de faire une cartographie des différents signaux émis lors de la désexcitation. Le contraste traduit l'intensité d'un signal. [27]



Figure 15 :Le microscope utilisé pour visualiser la morphologie de nos échantillons, de type FEI Quanta 200 qui a un détecteur GSED.

Résultats et discussions

Chapitre VI

Résultats et discussions

VI.1 Introduction :

Nous présentons dans cette partie les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons d'ajouts (Tuf, Bentonite, Pouzzolane).

On a utilisé les abréviations suivantes :

Mortier de référence (témoin) → combinaisons : MR.

Mortier avec 3% Tuf → combinaisons : MT 3%.

Mortier avec 6% Tuf → combinaisons : MT 6%.

Mortier avec 9% Tuf → combinaisons : MT 9%.

Mortier avec 12% Tuf → combinaisons : MT 12%.

Mortier avec 3% Bentonite → combinaisons : MB 3%.

Mortier avec 6% Bentonite → combinaisons : MB 6%.

Mortier avec 9% Bentonite → combinaisons : MB 9%.

Mortier avec 12% Bentonite → combinaisons : MB 12%.

Mortier avec 3% Pouzzolane → combinaisons : MPz 3%.

Mortier avec 6% Pouzzolane → combinaisons : MPz 6%.

Mortier avec 9% Pouzzolane → combinaisons : MPz 9%.

Mortier avec 12% Pouzzolane → combinaisons : MPz 12%.

Ces résultats portent sur la résistance mécanique (compression) aux échéances 7, 14, 21 et 28 jours, le coefficient d'absorption d'eau par capillarité ainsi que la rétention d'eau et la consistance des mortiers étudiés, et enfin sur la masse volumique des différents mortiers.

Les tests de rétention d'eau et du taux de gâchage ont été effectués au niveau du laboratoire de la SARL Mortero de Bejaïa. La confection des éprouvettes et la détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité ont été effectuées au niveau du laboratoire pédagogique béton du département génie civil de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

La caractérisation du comportement mécanique a été effectuée par approche expérimentale au niveau du laboratoire des travaux publics LTP Est de Bejaïa et au Laboratoire de Génie civil et des travaux publique LGCTP. Les résultats des essais sont présentés sous forme de tableaux et de courbes.

VI.2 Résultats obtenus

Les résultats du taux de gâchage, de rétention d'eau, du coefficient d'absorption d'eau et de la masse volumique des différents mortiers sont consignés dans les tableaux suivants :

échantillon essai	Echantillon référence MR
Taux de gâchage (%)	16.66
Rétention d'eau (%)	97.51
Coefficient d'absorption d'eau [kg/ (m ² min ^{1/2})]	0,0022
Masse volumique (Kg/m ³)	1760

Tableau 15: Résultats des tests sur le mortier référence MR

échantillon essai	MB 3 %	MB 6 %	MB 9 %	MB 12 %
Taux de gâchage (%)	17.87	22.92	23.45	25.28
Rétention d'eau (%)	84,17	85,17	64,90	43,87
Coefficient d'absorption d'eau[kg/ (m ² min ^{1/2})]	0,0015	0,0018	0,0019	0,0022
Masse volumique (Kg/m ³)	1699	1840	1788	1730

Tableau 16: Résultats des tests sur les mortiers de la Bentonite

échantillon essai	MT 3 %	MT 6%	MT 9%	MT 12%
Taux de gâchage (%)	15.86	16.87	18.69	18.91
Rétention d'eau (%)	96,61	93,48	94,53	94,72
Coefficient d'absorption d'eau [kg/ (m ² min ^{1/2})]	0.00048	0,00045	0,00069	0,00077
Masse volumique (Kg/m ³)	1755	1731	1693	1674

Tableau 17: Résultats des tests sur les mortiers de Le tuf

échantillon essai	MPz 3%	MPz 6%	MPz 9%	MPz 12%
Taux de gâchage (%)	16.96	17.84	19.54	19.81
Rétention d'eau (%)	99.70	99.571	99.751	98.43
Coefficient d'absorption d'eau [kg/ (m ² min ^{1/2})]	0.00063	0.0006	0.0004	0.0003
Masse volumique (Kg/m ³)	1742	1612	1424	1398

Tableau 18: Résultats des tests sur les mortiers de Pouzzolane

Les résultats des essais de résistance à la compression des différents mortiers à 28 jours d'âge, avec différents pourcentages de substitution, sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 19 : résultats des essais de la compression pour le 28 jours

Mortier référence(MPa)		3.26	
Echantillon pourcentage	bentonite (MPa)	Tuf (MPa)	Pouzzolane (MPa)
3 %	3.22	2.69	3,75
6 %	2.5	2.53	4,16
9 %	1.31	2.46	4,79
12 %	1.22	2.14	5,2

VI.3 Interprétation des résultats

VI.3.1 Masse volumique des mortiers à l'état durci

Avant chaque essai, les éprouvettes (de volume $V = 256 \text{ cm}^3$) sont pesées pour déterminer leur masse brute M . La masse volumique est égale à $\rho = M / V$.

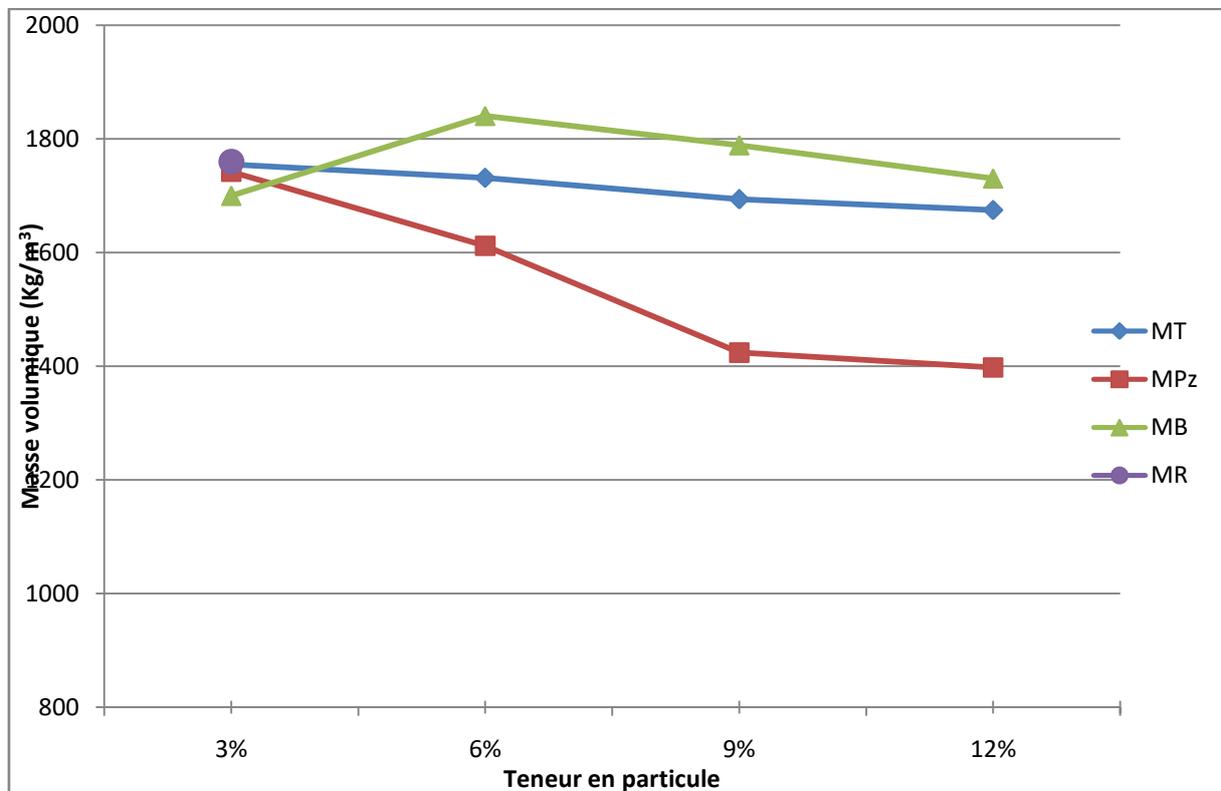


Figure 16 : évolution de la masse volumique des mortiers en fonction de la teneur en particules

La variation de la masse volumique du mortier MB

La variation de la masse volumique du mortier MB est irrégulière, elle augmente et diminue en fonction de la teneur en particule malgré les différents essais. La propriété d'absorption d'eau de la bentonite peut être à l'origine de cette irrégularité. En effet, la bentonite présente des phénomènes d'absorption différents (eau superficielle, eau interstitielle, eau de constitution...) pouvant conduire à l'obtention de masses volumiques différentes. Les résultats sont illustrés sur la figure 23.

Allègement du mortier à base de tuf

La variation de la masse volumique du mortier MT, en fonction de la teneur en particules de tuf, est donnée dans la *figure 23*. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la teneur en particules. Elle varie de 1755 à 1674 kg/m³, pour une teneur en particules de tuf allant de 3 % à 12%, correspondant à un allègement de l'ordre de 4.88%, par rapport à la masse volumique du mortier référence MR (1760 kg/m³). Outre la faible densité de tuf par rapport à celle du sable, l'allègement du composite est également attribué aux vides d'air piégés dans la matrice par l'introduction des particules de tuf.

Allègement du mortier à base de pouzzolane

La variation de la masse volumique des mortiers MPz, en fonction de la teneur en particules de la pouzzolane, est donnée dans la *figure 23*. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la teneur en particules. Elle varie de 1742 à 1398 kg/m³ pour les mortiers pouzzolanique et ce pour des teneurs en particules pouzzolane allant de 3% à 12%. Ceci correspond à un allègement de l'ordre de 20.56 % par rapport à la masse volumique du mortier référence MR (1760 kg/m³). L'allègement du composite est lié, d'une part, à la faible densité des particules de pouzzolane (comparées à celle du sable) et d'autre part à la structure finement poreuse des grains de pouzzolane qui permettent l'entraînement de l'air dans la matrice du mortier.

VI.3.2 Taux de gâchage

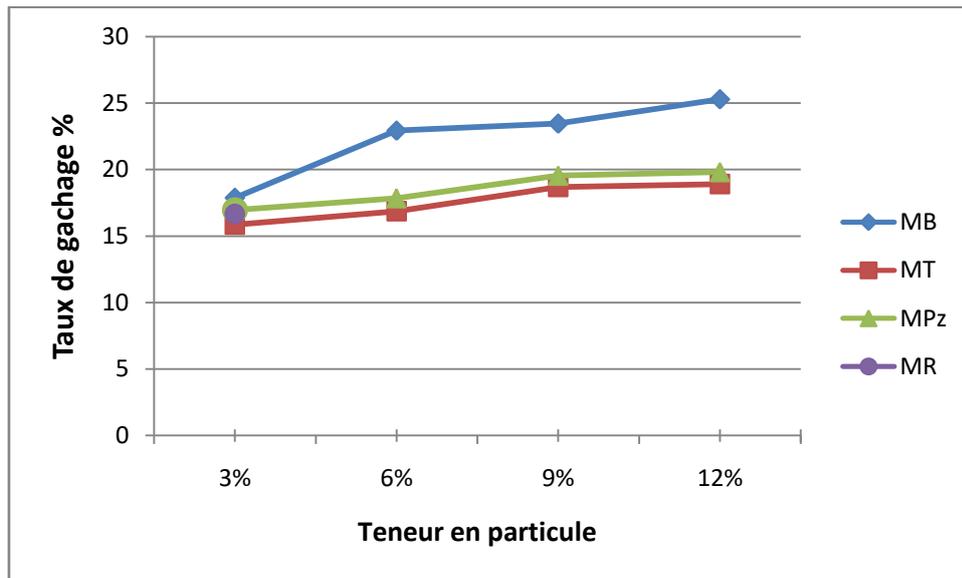


Figure 17 : évolution des taux des gâchages des mortiers en fonction de la teneur en particules

D'après les résultats obtenus durant les tests de détermination du taux de gâchage des mortiers, nous constatons l'augmentation du taux de gâchage en fonction de la teneur en particules incorporées.

La variation du taux de gâchage des mortiers MT et MPz, en fonction de la teneur en tuf et en pouzzolane est donnée dans les *tableaux 19 et 20*. Celle-ci augmente avec l'augmentation de la teneur en particules. Elle varie de 15.86 à 18.91% pour les mortiers MT et de 16.96 à 19.81% pour le mortier pouzzolane, et ce pour des teneurs en particules de ces deux derniers allant de 3 % à 12%.

Comparativement au taux de gâchage du mortier référence MR (16.66%), celui du mélange tuf-liant et pouzzolane-liant est élevé en raison des phénomènes d'empilement granulaire qui apparaissent dans ces mélanges et qui conduisent à des besoins en eau. Effectivement, la formation des blocs stables au sein de la pâte du liant, a pour conséquence d'emprisonner une certaine quantité d'eau qui n'est alors pas disponible pour hydrater le mélange. Il faut donc ajouter plus d'eau pour obtenir un mortier maniable.

Les figures ci-dessous représentent les images des mortiers réalisées au microscope électronique à balaye (MEB). Nous remarquons que pour le cas des mortiers MR, MT et MPz, les morphologies des matériaux données par le MEB semblent proches. Néanmoins, le mortier MT se distingue par une porosité plus accentuée. Ces images confortent les résultats obtenus sur les taux de gâchages.

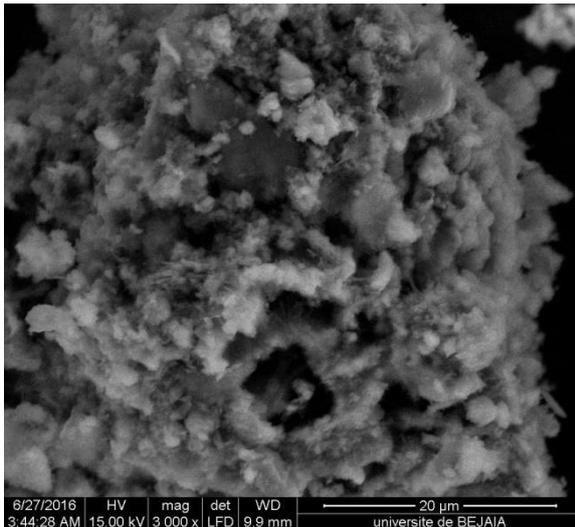


Figure 18: photo prise sur le MT avec un zoom de 3000

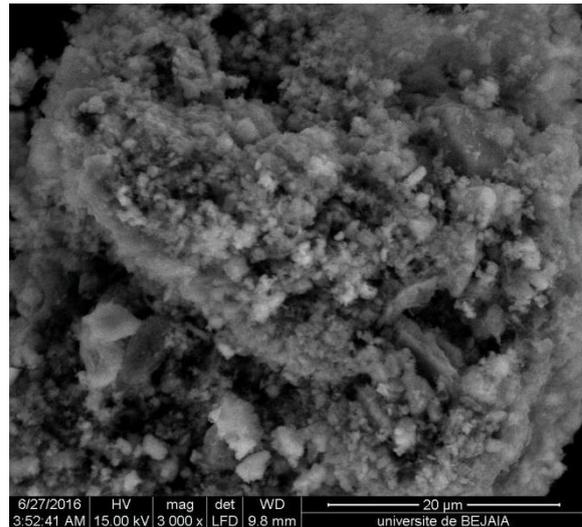


Figure 19: photo prise sur le MPz avec un zoom de 3000

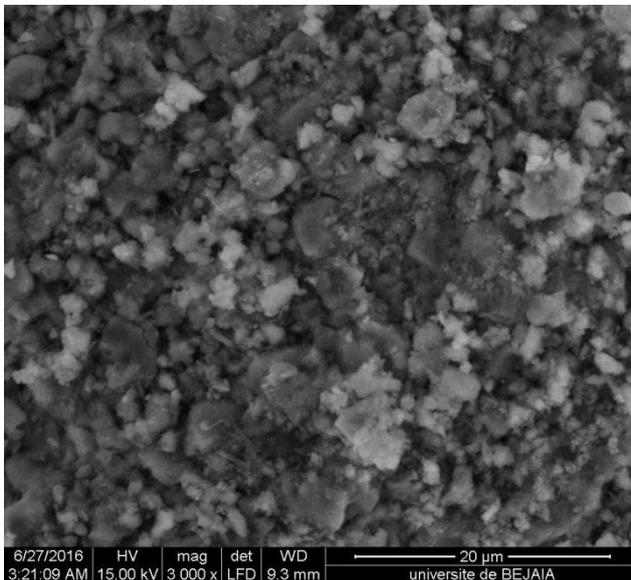


Figure 20 : photo prise sur le MR avec un zoom de 3000

En ce qui concerne les résultats obtenus lors de l'analyse des mortiers à base de bentonite MB (*tableau 18*), nous constatons que le taux de gâchage des mortiers augmente de 17.87 à 25.28% avec l'augmentation de la teneur en bentonite allant de 3 à 12%. Cela peut être expliqué par une propriété des bentonites qui est le gonflement de ses particules lors de leur contact avec l'eau, ayant pour conséquence l'augmentation de la quantité d'eau nécessaire à la préparation du mortier.

L'image MEB réalisée sur le mortier MB montre bien l'existence de pores (espaces interfoliaires ou interlamellaires des argiles) plus marqués que ceux du mortier MT. Le taux de gâchage très élevé obtenu sur ce mortier trouve son explication dans la présence de ces vides qui absorbent une grande quantité d'eau.

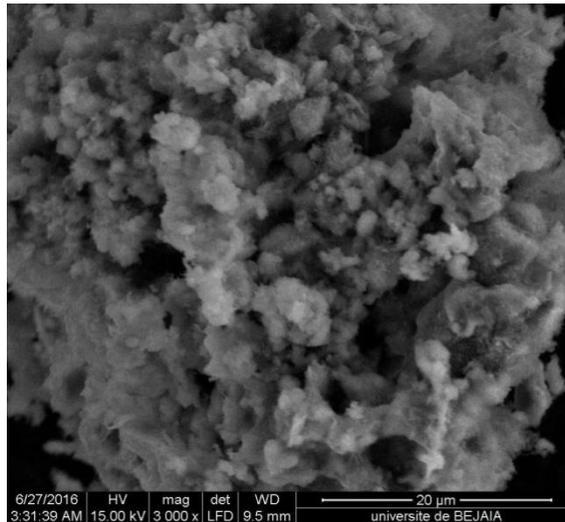


Figure 21 : photo prise sur le MB avec un zoom de 3000

VI.3.3 Rétention d'eau

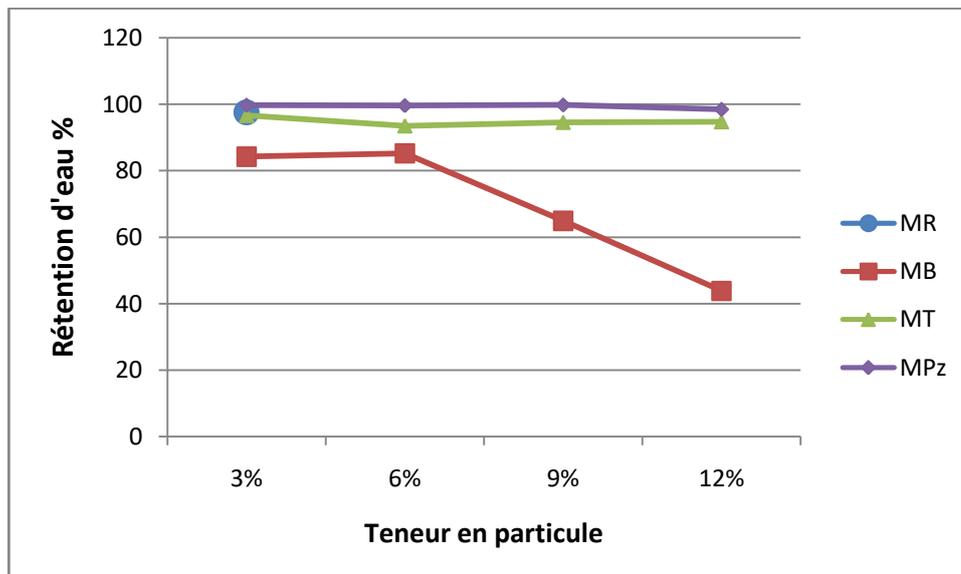


Figure 22: évolution de la rétention d'eau des mortiers en fonction de la teneur en particules

L'augmentation du pourcentage de substitution de 3 à 12 % de particule de pouzzolane, bentonite et de tuf, conduit à la diminution de la rétention d'eau de 99.70 à 98.43% pour les mortiers MPz, de 84.17 à 43.87% dans les mortiers MB et de 96.61 à 94.72 pour les mortiers MT. Dans les mortiers MB, les résultats des tests sur les mortiers de différents pourcentages de bentonite, montrent une diminution de la rétention d'eau (de 84.17 à 64.9%), en fonction de la teneur en perlite (de 3 à 9%). Ces résultats peuvent être interprétés par la présence de particules fines de bentonite, de tuf et de pouzzolane qui se disposent dans les interstices (entre les gros grains) des mortiers et conduisant ainsi à l'augmentation de la rétention d'eau.

Le mortier à 12% de bentonite montre une rétention très faible (43.87%), ce qui peut être expliqué par la dominance de la proportion des particules de bentonite sur les autres composants du mortier, et cela mène le mortier à perdre sa capacité de retenir son eau de gâchage.

VI.3.4 Absorption d'eau par capillarité

Les tests de l'absorption d'eau par capillarité effectués sur les spécimens montrent que les mortiers modifiés (MB, MT, MPz) présentent des coefficients inférieurs à $0,2 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0,5}$, et sont donc conformes aux normes (DTU 26.1, avril 2008) et ils sont classés dans la catégorie W_2 . Ceci peut être expliqué par l'effet de l'adjuvant sur les mortiers réalisés.

VI.3.5 Résistance à la compression à 28 jours

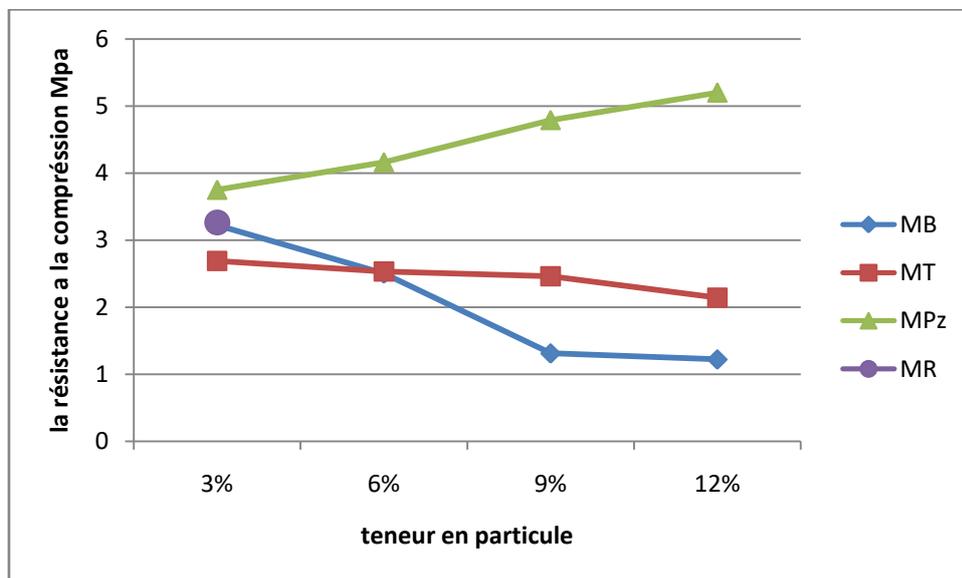


Figure 23 : évolution de la résistance a la compression des mortiers en fonction de la teneur en particules

La résistance à la compression de tous les mortiers croit du 1^{er} au 28^{em} jour, et cela est dû à l'hydratation des liants au fil du temps qui donne aux mortiers de bonnes caractéristiques mécaniques.

Au regard des résultats des tests de résistance mécaniques obtenus pour les mortiers MB, MT et MPz, il est très claire que pour les deux premiers cas, la résistance à la compression à 28 jours est inversement proportionnelle au taux de substitution du mortier, alors que pour le troisième cas, la résistance varie d'une façon proportionnelle avec le taux de substitution par la pouzzolane.

En effet, les valeurs des résistances à la compression varient de 3.22 à 1.22 MPa pour les mortiers MB, de 2.69 à 2.14 MPa pour les mortiers MT et de 3.75 à 5.2 MPa pour les mortiers MPz. Les valeurs présentées par le mortier pouzzolanique sont nettement supérieures à celles observées par le mortier de référence.

Les résultats obtenus montrent que les mortiers modifiés à base de pouzzolane restent dans la classe de résistance mécanique à la compression (CS III selon MERUC). Ces résultats sont directement liés à l'activité pouzzolanique (dans un mélange de pouzzolane, liant et eau une partie de silice de la pouzzolane réagit avec l'hydroxyde du calcium donnant lieu à la formation de silicate de calcium insoluble. La formation de ce dernier cause une augmentation de la résistance mécanique du mortier [18]) et à la bonne résistance de ses grains.

Les valeurs de résistances des mortiers MB varient de 3.22 (pour 3%) à 1,22 MPa (pour 12%). Ce mortier appartient à la classe de résistance CS I. Elles sont inférieures à la valeur de résistance du mortier référence MR (3,26MPa), cela peut être expliqué par la faible résistance des grains de la bentonite et par les vides créés lors de l'incorporation de la bentonite dans le squelette du mortier qui rend ce dernier moins résistant.

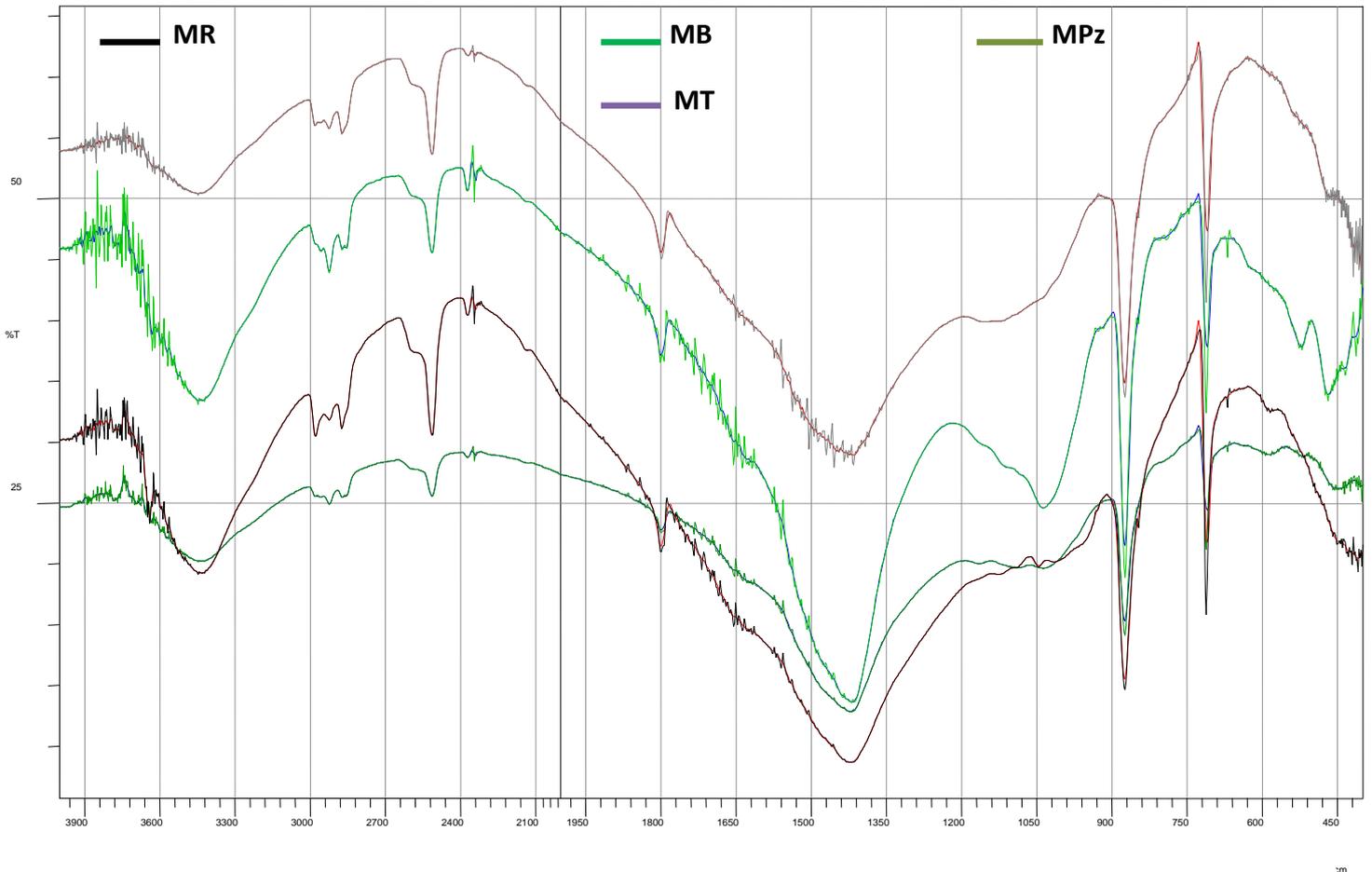
Les valeurs de résistances des mortiers MT varient de 2.69 (pour 3%) à 2.14 MPa (pour 12%), Ce mortier appartient donc à la classe de résistance CS II. Ces valeurs restent inférieures à la valeur de résistance du mortier référence MR (3,26MPa).

Sachant que tous les mortiers (de référence et ceux modifiés) contiennent les mêmes proportions en liant (ciment chaud), et vu que ces mortiers réagissent différemment aux tests de résistances mécaniques, nous pouvons avancer que les performances mécaniques (à la compression) de ces matériaux ne dépendent pas seulement du liant, mais aussi des proportions des autres constituants.

VII 3.6 Les spectres IR

Les spectres IR des échantillons des mortiers MR, MB, MT et MPz au 28^{ième} jour sont regroupés dans la figure ci-dessous.

Figure 24 : spectre IR des quatre mortiers



Dans les mortiers analysés, les bandes de vibrations IR de ces minéraux sont presque toutes masquées par les principales bandes de vibrations du ciment et des autres constituants des mortiers.

La spectroscopie IR a été utilisée pour comparer les positions des bandes IR de la pouzzolane, tuf et bentonite avant et après mélange. La richesse en bandes des spectres IR des mortiers utilisés (du aux différents types des liaisons) a malheureusement été dissimulée par la superposition des principales bandes IR de la pouzzolane.

Le déplacement des bandes IR renseigne sur la rigidité et la fragilité des liaisons avant et après modification des mortiers.

Par ailleurs, l'infrarouge nous montre la présence d'eau dans tous les mortiers au 28^{ième} jour après moulage.

Le tableau ci-dessous résume les principales bandes d'absorption IR récoltées des spectres du mortier de référence et des trois mortiers modifiés.

Principales bandes cm^{-1}	Attribution	Réf
500-530	- Déformations des liaisons Si-O-Si présent dans le clinker	[27]
600-880	- Elongation des liaisons S-O des SO_4^{2-} présents dans CaSO_4 du gypse - Déformation des liaisons Al-OH, Fe-OH et Mg-OH - Elongation des Si-O du clinker	[27]
1020	- Elongation asymétrique des liaisons Si-O-Si de la pouzzolane	[28]
1425	- Elongation des liaisons C-O présents dans CaCO_3 du carbonate de calcium	[27]
1800	- Déformation des liaisons H-O-H de l'eau interstitielle	[29]
2800	- Harmoniques des pics à 530 et 880 du clinker	[27]
2900		
3300-3500	- Elongation des liaisons O-H de l'eau	[28]

Tableau 20 : Analyse du spectre IR des quatre mortiers

La spectrométrie infrarouge reste une technique d'analyse qualitative de caractérisation des matériaux minéraux. Elle permet d'obtenir rapidement de nombreuses informations sur la composition des enduits à base de ciment.

Conclusion

Conclusion et perspectives

Les enduits jouent un rôle très important dans les constructions. Ils habillent les ouvrages en leur donnant esthétique et protection. À travers notre étude, nous avons voulu analyser l'expansion d'un enduit de façade, en lui incorporant des particules allégeantes, et calculer sa masse volumique et sa durabilité en se basant sur les essais de résistances mécaniques et de propriétés physiques.

À l'issue de nos travaux de laboratoire qui ont porté sur l'essai de trois types de mortiers d'enduits (MB, MT, MPz), on retiendra que :

- le mortier de référence MR est plus résistant à la compression que les mortiers MB et MT tandis que la résistance du mortier MPz à la compression est supérieure par rapport à celle du mortier de référence MR ;
- les deux mortiers modifiés réalisés (MT, MPz) ont des masses volumiques inférieures de l'ordre de 4.48% pour MT et de l'ordre de 20.56 % pour MPz par rapport à celle du mortier référence MR, ce qui conduit à un gain en poids et en coût importants. Dans le cas du mortier MB, qui a une masse volumique inférieure à celle du mortier de référence MR de l'ordre de 1.70 % qui est un résultat insatisfaisant, dans il faut faire des recherches plus approfondi.

Nos résultats, sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques des mortiers modifiés, et leur comparaison au mortier référence (témoin), révèlent que les mortiers modifiés sont de bonnes qualités et ils obéissent aux normes du domaine.

Notre étude nous a mené à réaliser de nouvelles recettes concernant la fabrication d'un enduit de façade léger avec de bonnes performances et de bons rendements économiques.

Compte tenu des résultats obtenus durant notre étude, la pouzzolane s'est avérée être un matériau doté de propriétés considérables (proche du clinker) et d'un large domaine d'utilisation surtout dans la construction et dans l'élaboration des mortiers légers.

Au-delà de ce qui précède, et pour enrichir davantage cette étude, nous souhaitons que des tests soient réalisés sur d'autres matériaux (à l'image des polymères) avec différents pourcentages de substitutions.

Références bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Guide pratique «Les enduits de façade » : mise en œuvre des enduits minéraux sur supports neufs et anciens, p. 5, 12 , Edition CSTB 2009.
- [2]. « *Enduits monocouches d'imperméabilisation* » ; cahiers du CSTB 2669, 1993.
- [3]. DTU 26.1 ; Document de la réunion de présentation du nouveau, FFB Vienne, 29 mai 2009.
- [4].DTU 26.1 : « Travaux de mortiers d'enduits » ; Partie 1-1, 1-2, 2 ; Avril 2008.
- [5].TEDESCHI L, CESA : Mécanismes physico-chimiques de dégradation des enduits de façades, Edition 13 mai 2010.
- [6]. MICKAEL, caractéristiques physico-chimiques, Edition 2009.
- [7]. GHOMARI F, « Pathologie des constructions »,thèse de doctorat, Université Aboubekr Belkaid, p.19, 2004.
- [8]. VENUAT M., La pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1 : «Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers» - édition2 – Collection Moniteur. – p.277, 1989.
- [9]. SOTEHI N, « Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation », thèse de doctorat, Université Mentouri - Constantine, p. 43, 2010.
- [10]. EYROLLES : Guide pratique «Les enduits de façade chaux, plâtre, terre » les enduits à la chaux, p. 12, 23, 50, Edition 2011.
- [11].Ciments calcia : « italcementi group » guide de la chaux, p. 6, 7, Edition décembre 2011.
- [12].BOCQUET H., CAUE allier : Fiche technique, Enduits, joints et mortiers de chaux, les composants de l'enduit, Edition juin 2013.
- [13]. AZZOUZ H, Mémoire magister, «Etude des bétons à base des sables de dune», Biskra 2009.
- [14]. CIM béton : Fiches techniques, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Tome 2 janvier 2013.
- [15]. Ecole d'Avignon, « Techniques et pratiques de la chaux », Eyrolles
- [16]. BELLIFA S, Mémoire magister, «Evolution de la porometrie des pates autoplaçantes »**2009**
- [17].BOUALLA N, Mémoire de - Licence, «Etude de l'influence de l'ajout de la pouzzolane sur les caractéristiques physico-chimiques des ciments» **Oran 2011**
- [18] [Source : Ministère de l'énergie et des mines, Bilan des activités minières - 2007-]
- [19].Site de conseils de constructions – www.leroymerlin.fr
- [20]. Jouenne C : Traité de céramique et matériaux minéraux.Tome II, (1964), p 40.
- [21]. CHAMBLEY H : Clay sedimentology, (1989), p 36.
- [22]. DIDIER G : Gonflement cristallin et macroscopique de bentonite. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon, France, (1972), 217p.
- [23]. DECARREAU A : Matériaux argileux. Structures, propriétés et applications, (1990), 179p.
- [24]S. Caillère et al : Minéralogie des argiles, 1^{ère} édition, Masson, Paris, (1963),217p.
- [25] . ABDELOUHAB C : Elimination sur quelques argiles bentonitiquesalgériennes de métaux lourds présents dans les eaux résiduaires industrielles cas du Cd(II) et Zn (II). Thèse de Magister, U.S.T.H.B, Alger, (1987), 217p.

- [26] GOUAL I, Thèse de docteur en génie civil, «Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application en construction routière»
- [27]. BENOSMAN S, TAIBI H, MOULAY M ET BELBACHIR M, Communication Science & Technologie, N°3 décembre 2004.
- [28]. PETIT S, ROBERT J.L, DECARREAU A, BESSON G, GRAUDY O, MARTIN F, (1995), Apport des méthodes spectroscopiques à la caractérisation des phyllosilicates 2/1, Bull. Centre Recherche. Expl. Prod. Elf Aquitaine, 19 (1) pp. 119-147.
- [29]. BOUTAHALA M, (1992), Etude physico-chimique d'une montmorillonite échangée : application à la conduction ionique. Thèse de Magister, Université de Sétif.

Liste des normes

Norme	Définition
ASTM C110	Méthodes d'essais normalisés pour essais physiques de chaux vive, chaux hydratée, et calcaire.
CSTB (Cahier N° 1777 de juin 1982).	Conditions générales d'emploi et de mise en œuvre des enduits d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques.
EN 1015.21	la compatibilité de l'enduit avec la famille de support considéré
NF EN 998-1	Décembre 2010. Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie - Partie 1 : mortiers d'enduits minéraux extérieurs et intérieurs
NF EN 1937	la méthode de mélange des mortiers de lissage et de nivellement à prise hydraulique avec de l'eau.
NF EN1015-18	Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci.
NF EN 1015-18 Mai 2003	Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 18 : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier
NF EN 1015-11	Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 11 : détermination de la résistance en flexion et en compression d'un mortier.
NF EN 998-1 Décembre 2010	Définitions et spécifications des mortiers pour maçonnerie.

Annexes

Les annexes

Résistance à la compression

Les essais sont réalisés sur les éprouvettes à différents âges après démoulage et conservation au laboratoire à l'air libre.

Les éprouvettes prismatiques sont testées à la compression comme sur la photo.



Figure 25 : dispositif d'essai de la résistance à la compression

Après avoir obtenu la valeur maximale de rupture **F_c** des demi-éprouvettes, la résistance à la compression **R_c** est calculée par la formule suivante :

$$R_c \text{ (Mpa)} = F_c \text{ (N)} / 1600$$



Figure 26: rupture d'un quart d'éprouvette

a) Résistance à la compression à 7 jours d'âge :

Tableau 23 : détails des mesures de résistances **Rc** des mortiers à 7 jours

Mortier d'enduit	Fc appliquée (KN)	Rc calculée (Mpa)
Mortier référence MR	3.1	1.937
MB 3 %	2.8	1,75
MB 6%	2.59	1.62
MB 9%	1.49	0.933
MB 12%	1.42	0.89
MT 3%	3.22	2.016
MT 6%	3.02	1.889
MT 9%	2.81	1.756
MT 12%	2.6	1.625
MPz 3%	4,33	2,708
MPz 6%	4,66	2,916
MPz 9%	5,66	3,5416
MPz 12%	6	3,75

b) Résistance à la compression à 14 jours d'âge :

Tableau 24 : détails des mesures de résistances **Rc** des mortiers à 14 jours

Mortier d'enduit	Fc appliquée (KN)	Rc calculée (Mpa)
Mortier référence MR	3.4	2.125
MB 3%	3.2	2
MB 6%	2.9	1.8125
MB 9%	1.6	1
MB 12%	1.44	0.9
MT 3%	3.32	2.075
MT 6%	3.29	2.056
MT 9%	3	1.875
MT 12%	2.8	1.75
MPz 3 %	5,33	3,333
MPz 6 %	6	3,75
MPz 9 %	6,66	4,16
MPz 12 %	7	4,375

c) Résistance à la compression à 21 jours d'âge :

Tableau 25 : détails des mesures de résistances R_c des mortiers à 21 jours

Mortier d'enduit	Fc appliquée (KN)	Rc calculée (Mpa)
Mortier référence MR	4.1	2.562
MB 3 %	3.8	2.375
MB 6%	3.5	2.1875
MB 9%	1.8	1.125
MB 12%	1.68	1.05
MT 3%	3.9	2.4375
MT 6%	3.8	2.375
MT 9%	3.2	2
MT 12%	3	1.875
MPz 3%	5,66	3,5375
MPz 6%	6,33	3,95625
MPz 9%	7	4,375
MPz 12%	7,33	4,58125

d) Résistance à la compression à 28 jours d'âge :

Tableau 26 : détails des mesures de résistances R_c des mortiers à 28 jours

Mortier d'enduit	Fc appliquée (KN)	Rc calculée (Mpa)
Mortier référence MR	5.52	3.26
MB 3%	5.16	3.227
MB 6 %	4	2.5
MB 9%	2.1	1.314
MB 12%	1.96	1.229
MT 3%	4.3	2.691
MT 6%	4.05	2.535
MT 9%	3.94	2.466
MT 12%	3.43	2.147
MPz 3%	6	3,75
MPz 6%	6,66	4,16
MPz 9%	7,66	4,791
MPz 12%	8,33	5,2

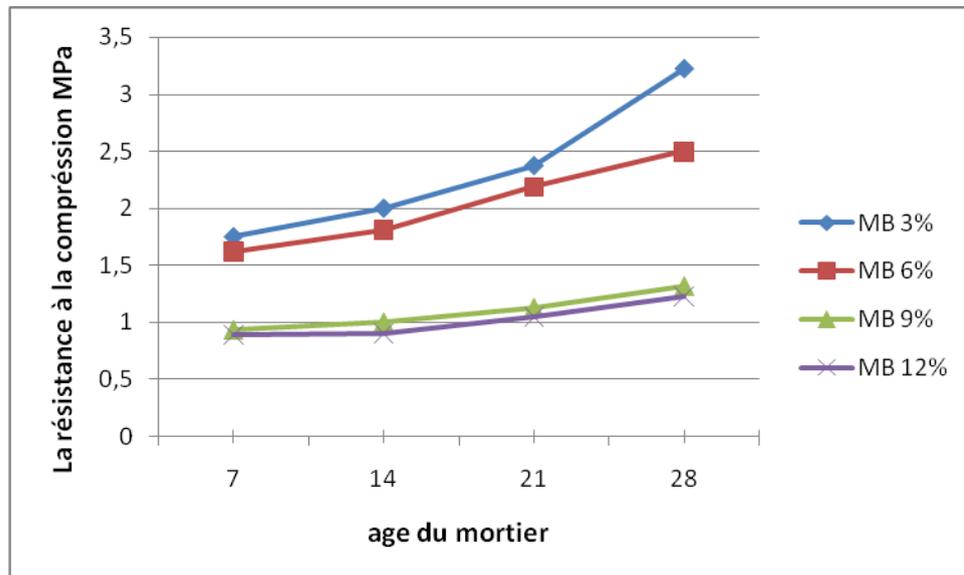


Figure 27 : évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de la bentonite en fonction de l'âge du mortier

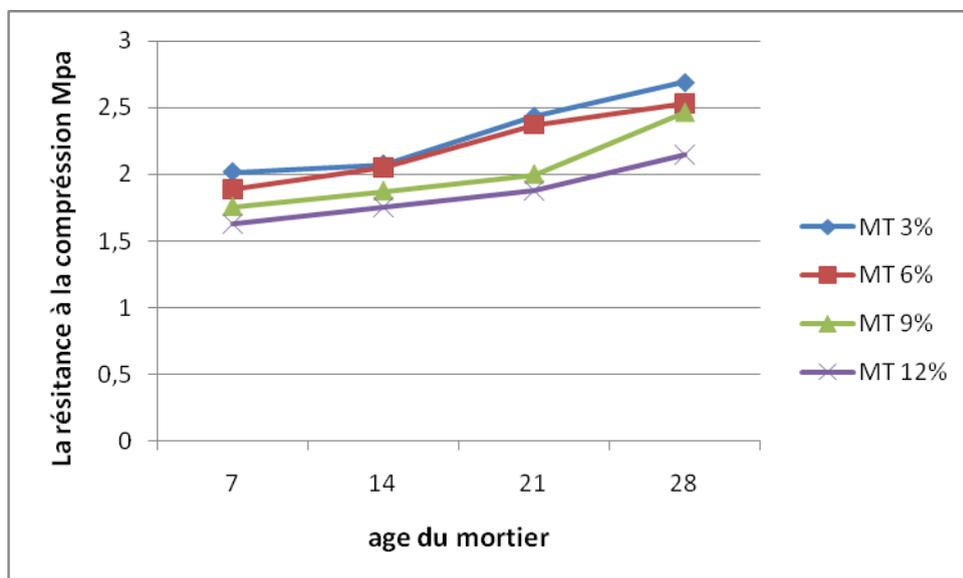


Figure 28: évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de tuf en fonction de l'âge du mortier

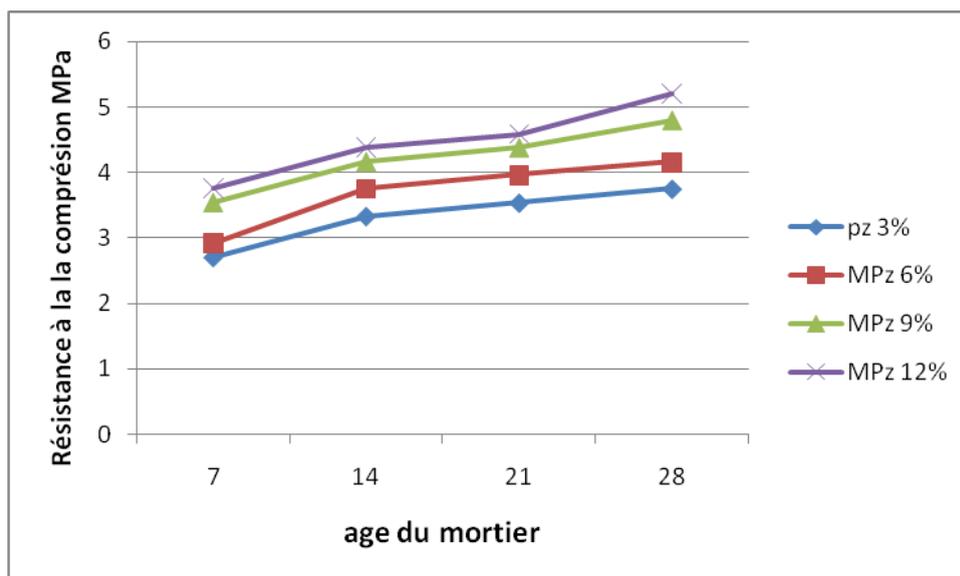


Figure 29: évolution de la résistance à la compression des mortiers à base de la Pouzzolane en fonction de l'âge du mortier

Confection des éprouvettes

Les éprouvettes des différents mortiers d'enduit ont été confectionnées et conservées, comme décrit dans la partie précédente, au sein du laboratoire pédagogique béton du département génie civil de l'université de Bejaia, comme dans la photo suivante :



Figure 30 : confection des éprouvettes

Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité

Les essais sont effectués sur les éprouvettes comme dans la figure suivante :



Figure 31 : dispositif de la détermination de l'absorption d'eau par capillarité

Après avoir obtenu la masse des éprouvettes **M1** après 10 minutes, et la masse **M2** après 90 minutes, le coefficient d'absorption d'eau **W** est alors calculé par la relation suivante :

$$W = 0,1 (M2 - M1) \dots \dots \dots \text{kg/ (m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$$

Tableau 27 : détails de mesure des coefficients d'absorption d'eau des mortiers

Mortier d'enduit	M1(Kg)	M2(Kg)	W [kg/ (m ² min ^{1/2})]
Mortier référence MR	0.3663	0.371675	0.000529
MB 3%	0,42056	0,43613	0.001557
MB 6%	0,42997	0.4485	0.001853
MB 9%	0.40877	0.428555	0.0019785
MB 12%	0.396195	0.419145	0.002295
MT 3%	0,400095	0,40475	0,000488
MT 6%	0,40765	0,41218	0,000453
MT 9%	0,38654	0,39348	0,000694
MT 12%	0,379565	0,38732	0,0007755
MPz 3%	0.3792	0.3855	0.000633
MPz 6%	0.38206	0.3881	0.000603
MPz 9%	0.38423	0.3891	0.000486
MPz 12%	0.3447	0.3484	0.00037

Figure 32: spectre IR de MR et de MB

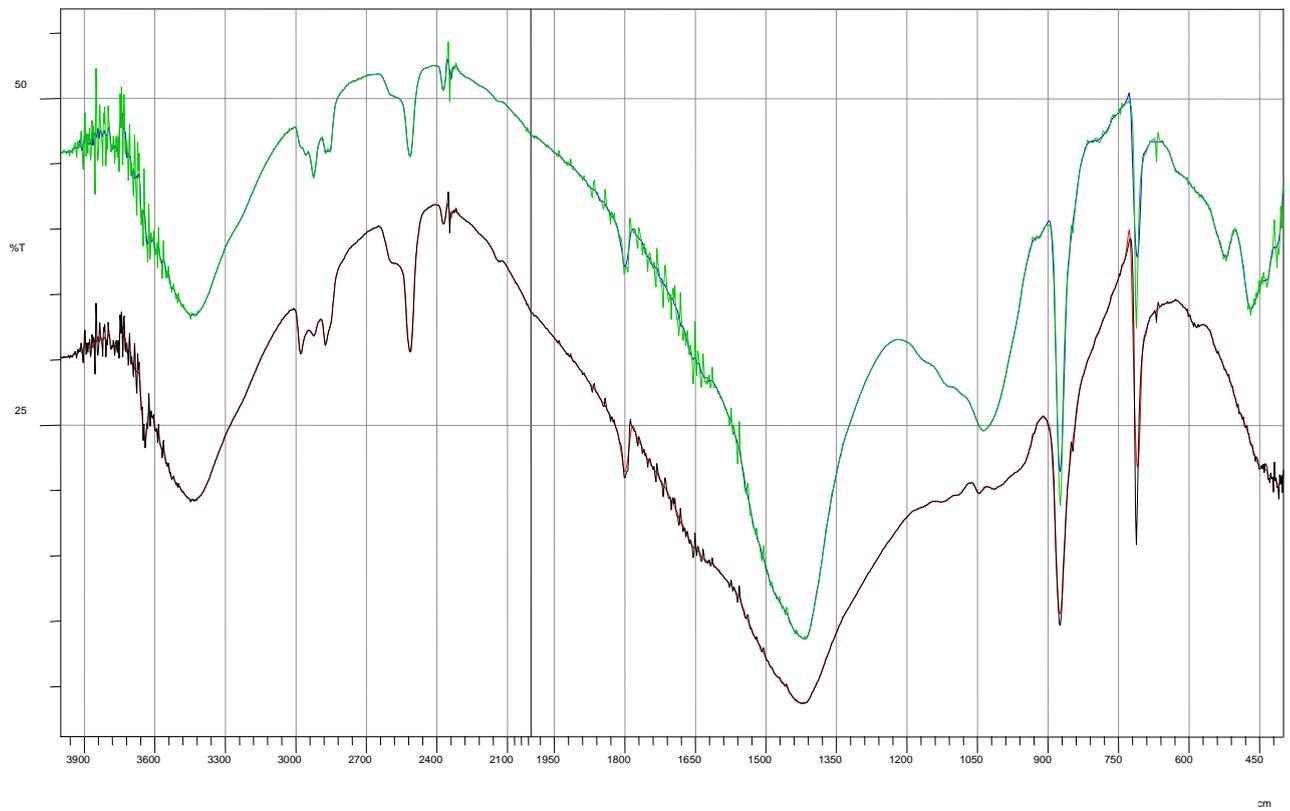


Figure 33 : Spectre IR de MR et MT

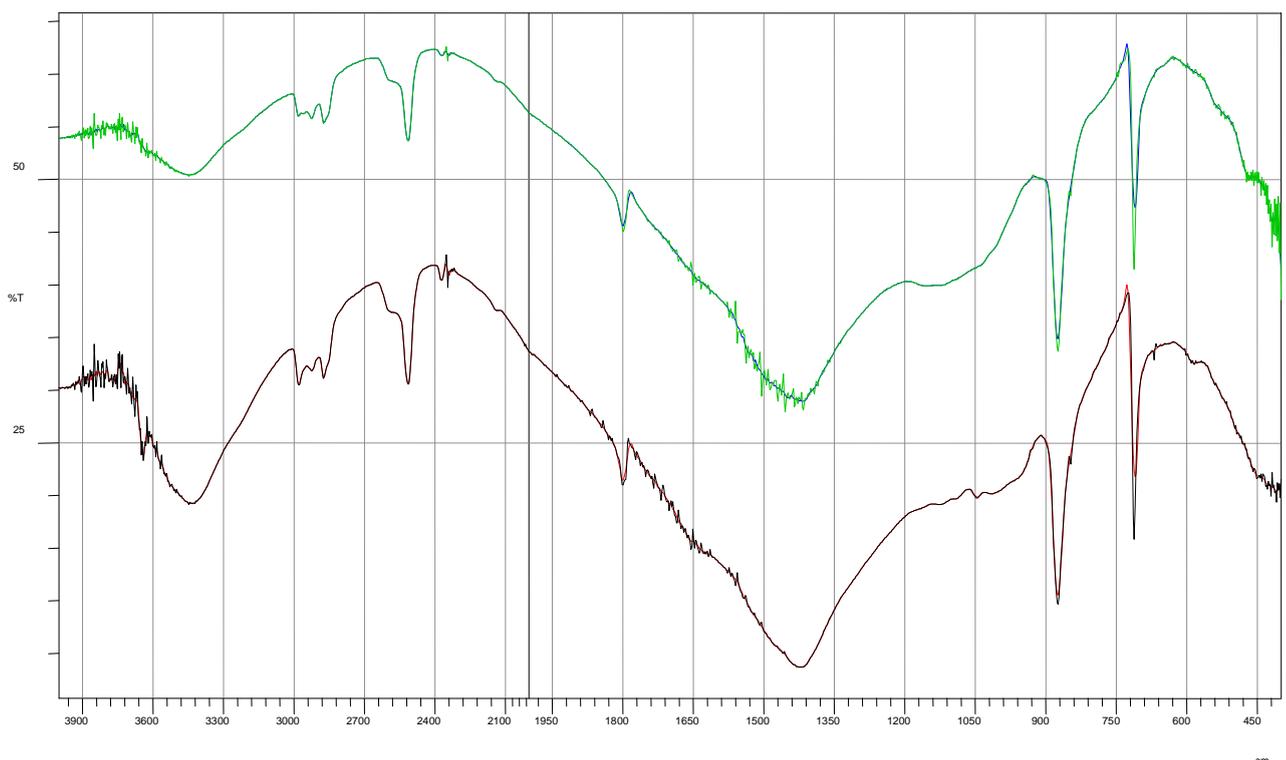


Figure 34: Spectre IR de MR et MPz

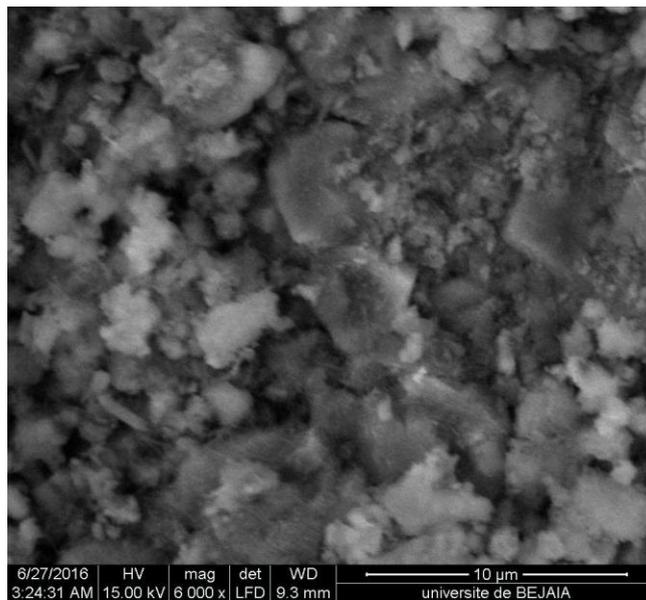
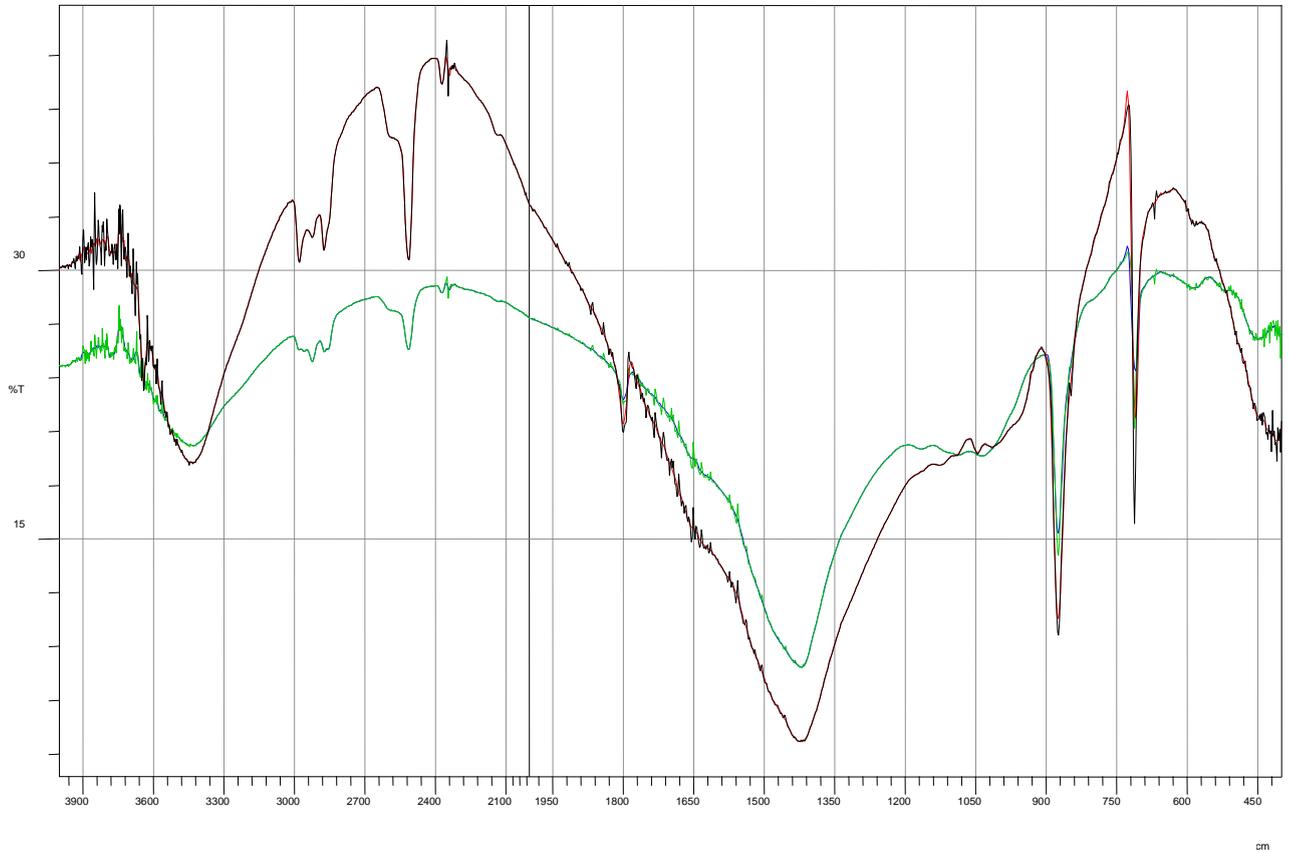


Figure 35: photo prise sur le MR avec un zoom de 6000

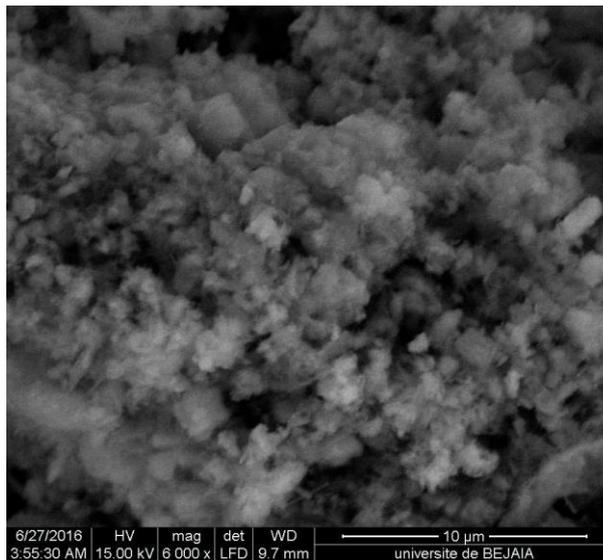


Figure 36 : photo prise sur le MPz avec un zoom de 6000

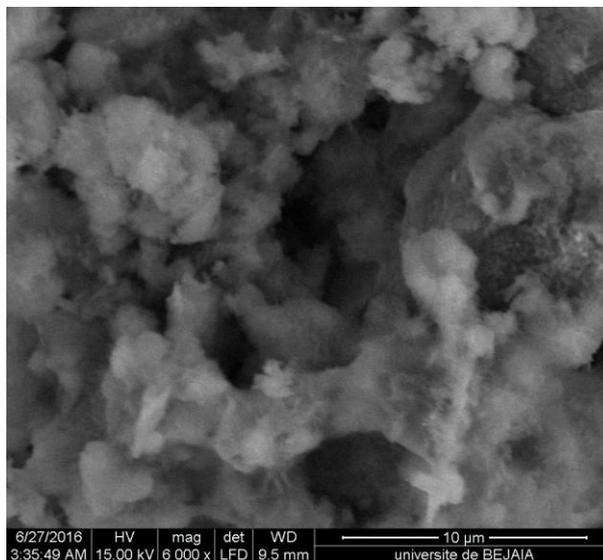


Figure 37: photo prise sur le MB avec un zoom de 6000

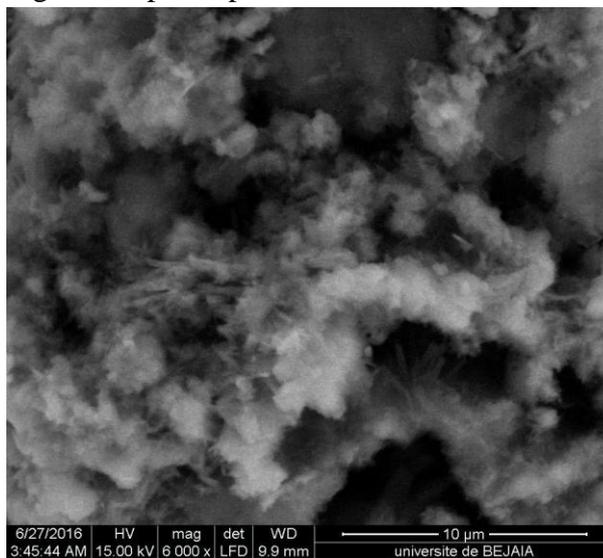


Figure 38 : photo prise sur le MT avec un zoom de 6000

Résumé

Cette étude, répondant aux exigences du développement durable, consiste à élaborer, et à caractériser un mortier d'enduit composite obtenu par substitution d'une fraction appropriée de granulats naturels (sable d'un enduit normalisé) par des particules de matériaux légers.

Ces matériaux naturels bentonite, tuf et pouzzolane ont été incorporés dans un enduit de façade normalisé avec différents pourcentages de substitution allant de 3 à 12 %. Les enduits modifiés ainsi obtenus ont fait l'objet d'une caractérisation pour la détermination de leurs caractéristiques mécaniques et physiques, et de l'effet de ces particules sur l'allègement de cet enduit normalisé.

Mots clés : enduit, allègement, coûts, bentonite, tuf, pouzzolane, masse volumique, propriétés mécaniques des mortiers, propriétés physico-chimique des mortiers.

summary

This study, meeting the requirements of sustainable development, is to develop and characterize a composite coated with mortar obtained by substituting an appropriate fraction natural aggregates (sand of a standardized coating) by particles of light materials.

These natural materials, bentonite, tuff and pouzzolane, were incorporated into a standardized outside plaster with different substitution percentages ranging from 3 to 12%. Modified coatings obtained were subject to a characterization to determine their mechanical and physical characteristics, and the effect of these particles on the easing of this standardized coating.

Keywords: coating, lightening, costs, tuff, pouzzolane, density, mechanical properties of mortars, physico-chemical properties of mortars.