



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

01 BP 594 Ouagadougou 01 Tel : (226) 50 30 71 16/17 – 50 30 20 53 Fax : (226) 31 27 24 Email : www.2ie-edu.org

Année académique 2009 – 2010

LES ENDUITS TRADITIONNELS : TECHNIQUES DE FABRICATION, MISE EN ŒUVRE ET DURABILITE

MEMOIRE

POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION : GENIE CIVIL

Présenté et soutenu publiquement le 15 juin 2010 par :

KADJILE Edouard

Travaux dirigés par :

Jean – Hugues THOMASSIN

Enseignant en Science des Matériaux au ZiE, UTER SMDD

Jury d'évaluation :

Ismaïla GUEYE : Président

VINAI RAFFAËLE : Membre

LAWANE GANA Abdou : Membre

Promotion [2009 / 2010]

DEDICACE



REMERCIEMENTS

Nous voudrions à travers ces lignes, traduire toute notre reconnaissance et notre profonde gratitude à toutes les personnes de bonne volonté, qui de près ou de loin, de façon directe ou indirecte ont contribué à la réussite de ce travail :

- Nous tenons principalement à remercier notre encadreur Monsieur Jean-Hugues THOMASSIN pour sa disponibilité et les conseils avisés qu'il nous a prodigué tout au long de notre travail ;
- Nous remercions très vivement Monsieur Ismaïla GUEYE et Monsieur Jean-Pierre ESSONE pour les enseignements et les conseils que nous avons reçus d'eux et pour les efforts qu'ils déploient dans l'organisation et la conduite des stages ;
- Nos remerciements vont également à l'endroit de Monsieur Salif KABORE du Laboratoire Génie Civil de 2iE pour son attention et les moyens mis à notre disposition pour la réussite de ce travail ;
- Nous ne saurions terminé sans remercier tous les enseignants du 2iE dont l'apport de connaissance et d'orientation pendant les trois (3) années que nous avons passés ensemble, nous a permis de faire ce travail.
- Enfin, Nous remercions très chaleureusement tous nos promotionnaires de la filière génie civil qui nous ont permis d'étendre notre famille au-delà des frontières, que notre grandeur se fasse entendre en Afrique et dans le monde entier.

Thème

Les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité

RESUME

Les enduits traditionnels sont pour l'habitat non seulement des éléments de dressage et de décoration des façades mais surtout de protection contre les hostilités que présente l'environnement (pluie, soleil, vent). Ce rôle délicat que doivent jouer les enduits, exige que ces derniers aient une durabilité satisfaisante et des techniques de fabrication et de mise en œuvre qui répondent aux normes et documents techniques spécifiques tels que le DTU 26.1.

Dans les savoirs traditionnels africains des enduits, l'adjonction de certains agents comme le jus de néré, le beurre de karité fondu, la bouse de vache, la gomme arabique ou encore le bitume augmentent la durabilité des enduits qui sont réalisés souvent à base de la terre. Le transfert de cette expérience africaine du néré dans la construction a fait l'objet d'une étude de laboratoire. Ainsi les caractéristiques retenues pour évaluer la durabilité de ces mortiers d'enduits sont : la résistance mécanique aux chocs, la résistance aux agressions chimiques et la stabilité volumétrique.

Les résultats de l'étude montrent que la présence du néré, dans les mortiers d'enduits testés, améliore d'une part leur résistance à la compression à partir du 14^{ème} jour de leur cure sous l'eau et d'autre part, leur résistance à l'agression de la solution de sulfate de sodium. En outre, ces mortiers présentent une faible capillarité ($w < 0,2 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0.5}$), ce qui permet leur utilisation sur des surfaces exposées à la pluie.

Des études complémentaires à effectuer sur une plus longue durée (au moins 28 jours) sont nécessaires pour confirmer les résultats auxquels la présente étude a aboutis.

Mots clés :

- 1- Enduits traditionnels
- 2- Jus de néré
- 3- Résistance mécanique
- 4- Agressions chimiques
- 5- Stabilité volumétrique

Topic

Traditional coatings: techniques of manufacture, implementation and durability

ABSTRACT

The traditional coatings are for the habitat not only measures of raising and decoration of the frontages but especially protection against the hostilities which the environment (rain, sun, wind) presents. This delicate role that the coatings must play, requires that the latter have a satisfactory durability and techniques of manufacture and implementation which answer the specific standards and technical documents such as the DTU 26.1.

In the African traditional knowledge of the coatings, the addition of certain agents like the juice of *nééré*, molten shea butter, the dung of cow, gum arabic or the bitumen increase the durability of the coatings which are often carried out containing the ground. The transfer of this African experiment of *nééré* on the construction to fact the object of a study of laboratory. Thus the characteristics selected to evaluate the durability of these mortars of coatings are: mechanical resistance to the shocks, resistance to the chemical aggressions and volumetric stability.

The results of the study show that the presence of *nééré*, in the mortars of coatings tested, improves on the one hand their compressive strength as from the 14th day of their cure under water and on the other hand, their resistance to the aggression of the sodium sulfate solution. Moreover, these mortars have a low capillarity ($w < 0,2 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0.5}$), which allows their use on the surfaces exposed to the rain.

Complementary studies to carry out over more a long life (at least 28 days) are necessary to confirm the results to which the present study led.

Keys words:

- 1- Traditional coatings
- 2- Juice of *nééré*
- 3- Mechanical resistance
- 4- Chemical aggressions
- 5- Volumetric stability

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
C ₃ A	: Aluminate tricalcique
CCS	: Cahier des Clauses Spéciales
CCT	: Cahier des Clauses Techniques
CGM	: Critères Généraux de choix des Matériaux
CSTB	: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DTU	: Document Technique Unifié
MERUC	: Masse, Elasticité, Résistance, humidification, Capillarité
MgCl ₂	: Chlorure de magnésium
MN	: Mortier au Néré
MR	: Mortier de Référence
NaSO ₄	: Sulfate de Sodium
RPE	: Revêtement Plastique Epais
RSE	: Revêtement Semi Epais

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°1 : Classification des enduits suivant le MERUC.....	7
Tableau n°2 : Caractérisation des enduits de façade.....	12
Tableau n°3 : Choix de type d'enduit en fonction du support.....	13
Tableau n°4 : Liants minéraux utilisés pour la fabrication des enduits traditionnels.....	21
Tableau n°5 : Effet de type d'adjuvant sur le mortier.....	22
Tableau n°6 : Principales caractéristiques des enduits traditionnels.....	24
Tableau n°7 : Dosage liant pour un m ³ d'enduit.....	24
Tableau n°8 : Dosage liant pour la réalisation de 20 m ² d'enduit.....	25
Tableau n°9 : Composition des mélanges à réaliser.....	31
Tableau n°10 : Dosage des mélanges à réaliser.....	32
Tableau n°11 : Résultats des essais de traction par flexion.....	37
Tableau n°12 : Résultats des essais de compression.....	38
Tableau n°13 : Masse volumique apparente des mortiers étudiés.....	39
Tableau n°14 : Résultats des essais de résistance au sulfate de sodium à 5%.....	40
Tableau n°15 : Résultats des essais de résistance au chlorure de magnésium à 5%.....	41
Tableau n°16 : Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité des mortiers.....	43
Tableau n°17 : Résultats des variations pondérales des mortiers.....	43
Tableau n°18 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MR à 2 jours.....	49
Tableau n°19 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MN à 2 jours.....	49
Tableau n°20 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MR à 7 jours.....	49
Tableau n°20 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MN à 7 jours.....	49
Tableau n°21 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MR à 14 jours.....	50
Tableau n°22 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MN à 14 jours.....	50
Tableau n°23 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MR à 21 jours.....	50
Tableau n°24 : Détails des mesures de résistance R _f du mortier MN à 21 jours.....	50
Tableau n°25 : Détails des mesures de résistance R _c du mortier MR à 2 jours.....	51
Tableau n°26 : Détails des mesures de résistance R _c du mortier MN à 2 jours.....	52
Tableau n°27 : Détails des mesures de résistance R _c du mortier MR à 7 jours.....	52
Tableau n°28 : Détails des mesures de résistance R _c du mortier MN à 7 jours.....	52
Tableau n°29 : Détails des mesures de résistance R _c du mortier MR à 14 jours.....	53
Tableau n°30 : Détails des mesures de résistance R _c du mortier MN à 14 jours.....	53

Tableau n°31 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MR à 21 jours.....	53
Tableau n°32 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MN à 21 jours.....	54
Tableau n°33 : Détails de résistance à la solution de sulfate de sodium à 5%.....	55
Tableau n°34 : Détails de résistance à la solution de chlorure de magnésium à 5%	55

LISTE DES FIGURES

Figure n°1 : Principale fonction de l'enduit.....	6
Figure n° 2 : Principe d'exécution de la première couche (gobetis)	28
Figure n°3 : Principe d'exécution de la deuxième couche (corps d'enduit)	29
Figure n°4 : Principe d'exécution de la troisième couche (finition)	29
Figure n°5 : Principe d'exécution de l'enduit multicouche.....	30
Figure n°8 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers étudiés.....	37
Figure n°9 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.....	38
Figure n°10 : Evolution de la masse volumique apparente des mortiers étudiés.....	40
Figure n°11 : Evolution de la perte en masse par le Na_2SO_4 des mortiers étudiés	40
Figure n°12 : Evolution de la perte en masse par le MgCl_2 des mortiers étudiés	41

LISTE DES PHOTOS

Photo n°1 : Palais royal du Na-Yiri de Kokologho (Burkina Faso).....	17
Photo n°2 : Spécimens des mortiers pour les tests	48
Photo n°3 : Dispositif d'essai de la résistance à la traction par flexion	48
Photo n°4 : Dispositif d'essai de la résistance à la compression.....	51

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
PREMIERE PARTIE : GENERALITES ET PROBLEMATIQUE	4
CHAPITRE I : LES ENDUITS DANS L’HABITAT	5
I.1 DEFINITION ET FONCTIONS DE L’ENDUIT.....	5
I.1.1 DEFINITION DE L’ENDUIT.....	5
I.1.2 FONCTIONS DE L’ENDUIT.....	5
I.2 NORMALISATION ET CONCEPT D’ENDUIT TRADITIONNEL.....	7
I.2.1 APERCU SUR LA NORMALISATION DES ENDUITS	7
I.2.2 CONCEPT D’ENDUIT TRADITIONNEL SELON LES DTU	9
I.3 TYPOLOGIE ET PATHOLOGIE DES ENDUITS	10
I.3.1 TYPOLOGIE DES ENDUITS TRADITIONNELS.....	10
I.3.2 PATHOLOGIE DES ENDUITS TRADITIONNELS	13
I.4 LES ENDUITS DANS LE CONTEXTE AFRICAIN.....	16
I.4.1 SITUATION ET ENJEU	16
I.4.2 LES AGENTS STABILISATEURS	16
CHAPITRE II : PROBLEMATIQUE DES ENDUITS TRADITIONNELS	18
II.1 ENONCE DU PROBLEME.....	18
II.2 OBJECTIFS ET HYPOTHESES	19
II.2.1 OBJECTIFS DE L’ETUDE	19
II.2.2 HYPOTHESES DE L’ETUDE.....	19
DEUXIEME PARTIE : ENDUITS TRADITIONNELS	20
CHAPITRE III : TECHNIQUES DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE ..	21
III.1 LES ELEMENTS DE CONSTITUTION DES ENDUITS.....	21

III.1.1	LES LIANTS MINERAUX.....	21
III.1.2	LES SABLES.....	21
III.1.3	LES ADJUVANTS.....	22
III.1.5	L'EAU DE GACHAGE.....	22
III.2	TECHNIQUES DE FABRICATION.....	23
III.2.1	LE DOSAGE DU MORTIER.....	23
III.2.2	REALISATION MANUELLE DU MORTIER.....	25
III.2.3	REALISATION MECANIQUE DU MORTIER.....	25
III.3	TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE.....	26
III.3.1	PREPARATION DU SUPPORT.....	26
III.3.2	MATERIELS ET TECHNIQUES D'EXECUTION.....	27
CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE.....		31
IV.1	METHODOLOGIE D'ETUDE.....	31
IV.1.1	CHOIX DES MATERIAUX.....	31
IV.1.2	COMPOSITION DES MELANGES A REALISER.....	31
IV.1.3	CONFECTION DES EPROUVETTES.....	32
IV.1.4	DURABILITE DES ENDUITS.....	32
VI.1.5	PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	32
IV.2	RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	37
IV.2.1	PERFORMANCES MECANIQUES.....	37
IV.2.2	RESISTANCE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES.....	40
VI.4.3	STABILITE VOLUMETRIQUE.....	43
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		44
BIBLIOGRAPHIE.....		45
LES ANNEXES.....		47

INTRODUCTION

Un des atouts majeurs de l'habitat, traditionnel ou moderne, est son originalité. Cette originalité s'exprime dans l'utilisation des matériaux, les formes et l'agencement des espaces, mais aussi à travers l'aspect esthétique de ses façades. Cette originalité est le résultat d'un long processus dont l'homme tient les rênes : l'habitat a pour point de départ les besoins, les aspirations et les savoir-faire de l'homme, et pour finalité la satisfaction de ses besoins. De ce fait l'habitat devient le vecteur d'une culture constructive.

Cette culture constructive se traduit, que ce soit en Afrique ou partout ailleurs, par la variété des architectures, la richesse des formes construites, la maîtrise des matériaux traditionnels de construction, des techniques constructives et par une organisation efficace de la main-d'œuvre et des dépenses d'énergie liée à la construction.

Si l'environnement offre un choix de matériaux dont l'utilisation intelligente permet d'aboutir à une grande variété architecturale, il présente aussi des hostilités contre lesquelles les constructions doivent être protégées. Il s'agit de la pluie et ses conséquences (érosion, remontée d'humidité), du soleil et de son incidence sur le confort thermique, des attaques des milieux agressifs et, enfin, des effets du vent. Ce rôle protecteur des constructions est assuré par l'enduit de façade.

Cette étude orientée sur « **les enduits traditionnels : techniques de fabrication, mise en œuvre et durabilité** » qui se veut à la fois synthétique et complémentaire des études similaires faites sur le sujet, se basera sur une revue bibliographique et des travaux de laboratoire pour fournir une étude de recherche pour la réalisation des enduits traditionnels durables.

Le présent mémoire est divisé en deux parties :

La **première partie** traite du cadre général et de la problématique de l'étude.

La **deuxième partie** présente l'étude des enduits traditionnels. Dans un premier temps, l'étude porte sur les techniques de fabrication et de mise en œuvre. Dans un deuxième temps, l'étude se focalise sur une approche expérimentale des enduits traditionnels. A ce niveau, il est présenté la méthodologie de l'étude. Les différents résultats des essais réalisés en laboratoire et les discussions qui en découlent permettront de caractériser les enduits traditionnels testés.

PREMIERE PARTIE :

GENERALITES ET

PROBLEMATIQUE



CHAPITRE I : LES ENDUITS DANS L'HABITAT

I.1 DEFINITION ET FONCTIONS DE L'ENDUIT

I.1.1 DEFINITION 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, et éventuellement d'autres caractéristiques ; à l'extérieur, pour la protéger des intempéries et souvent constituer un parement uniforme à caractère décoratif et, à l'intérieur pour servir d'élément pour l'esthétique. Dans ce dernier cas, l'enduit est du domaine de confort plutôt que de la protection.

Les enduits sont constitués d'un liant (chaux, plâtre, ciment ou terre) et de charges minérales (agrégats, ou granulats, comme le sable ou la poussière de marbre). On peut ajouter aux enduits à base de terre des charges végétales ou animales (pailles de blé, de riz, solution de néré, bouse de vache, crins d'animaux divers, etc.). L'adjonction de pigments (charges colorantes) n'est pas indispensable, elle dépend de l'effet recherché.

I.1.2 FONCTIONS DE L'ENDUIT

Suivant leur nature, les enduits extérieurs assurent une ou plusieurs des trois fonctions suivantes :

- ❖ 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.

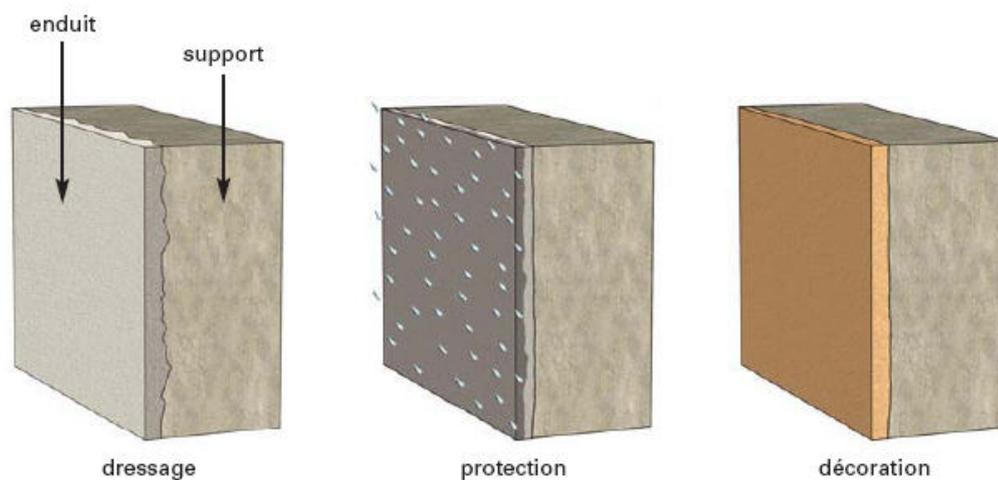
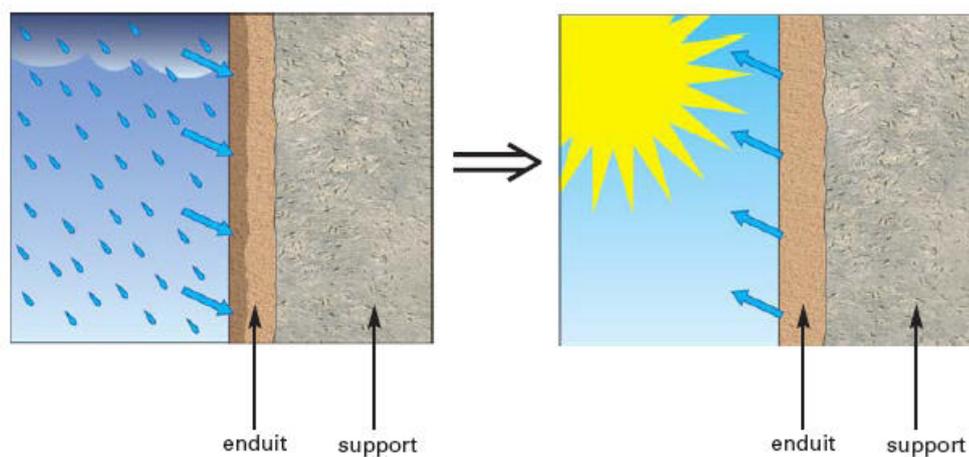


Figure n°1 : Principales fonctions de l'enduit

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 support¹.

L'absorption d'eau par capillarité conditionne en partie la fonction d'imperméabilisation, cette fonction dépendant également du nombre de couches et de l'épaisseur d'enduit.



Lors des périodes de pluie, l'eau mouille l'enduit et éventuellement la paroi extérieure des éléments de la maçonnerie.

Après la pluie, l'eau s'évapore de l'enduit.

¹CSTB : Guide pratique «Les enduits de façade » : mise en œuvre des enduits minéraux sur supports neufs et anciens, Edition 2009, 96p, p5.

La *texture* varie selon les modes d'application de l'enduit. Ceux-ci sont 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.2 NORMALISATION ET CONCEPT D'ENDUIT TRADITIONNEL

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

I.2.1 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 n°1 : Classification des enduits suivant le MERUC

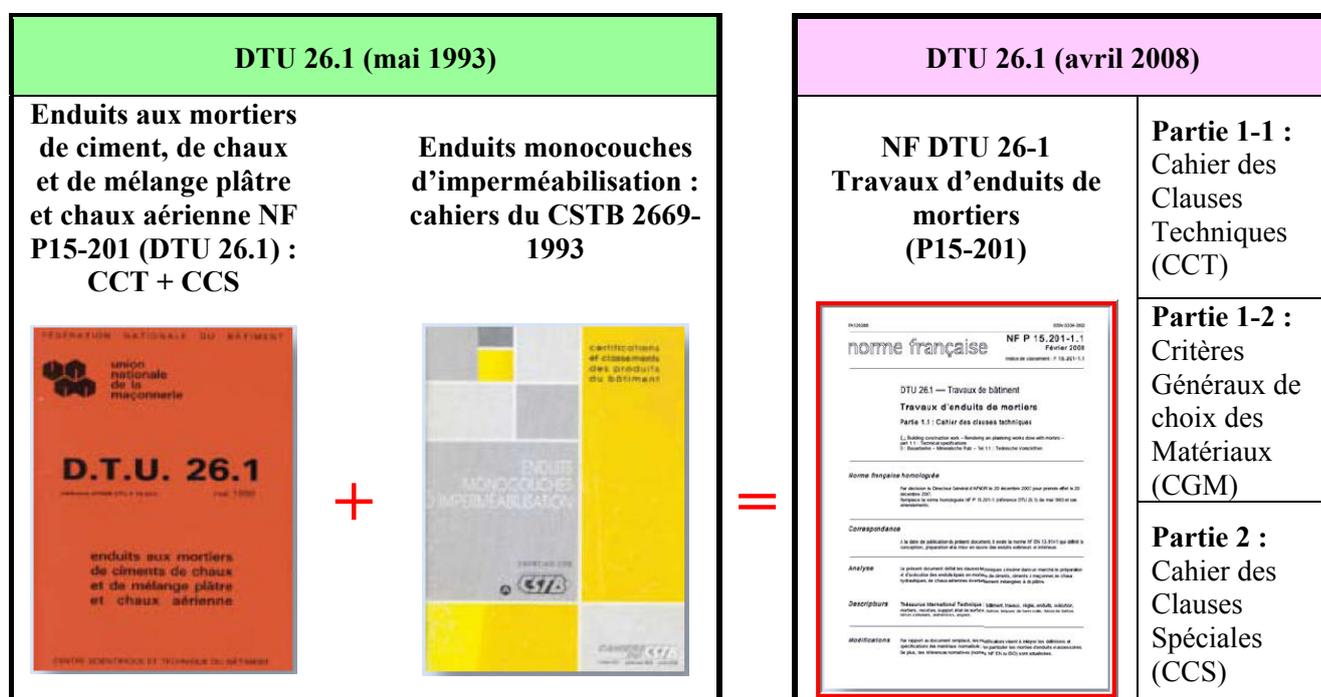
M : Masse volumique apparente de l'enduit durci	[Kg/m ³]	M1	...	M6
		< 1200	...	> 1800
E : Module d'Elasticité	[MPa]	E1	...	E6
		< 5000	...	> 16000
R : Résistance à la traction	[MPa]	R1	...	R6
		< 1,5	...	> 3,5
U : Rétention d'eau (humidification)	-	U1	...	U6
		< 78%	...	95% < x < 100%
C : Capillarité (porosité)	g/dm ³ .min ^{1/5}	C1	...	C6
		< 1,5	...	> 10

Source : Cahiers du CSTB

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 neufs². 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.

² FFB Vienne : Document de la réunion de présentation du nouveau DTU 26.1, 29 mai 2009

1.2.2 CONCEPT D'ENDUIT TRADITIONNEL 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 d'aspect rugueux ;
- 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.3 TYPOLOGIE ET PATHOLOGIE DES ENDUITS

I.3.1 TYPOLOGIE DES ENDUITS TRADITIONNELS

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

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).

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.

b. Selon le mode de fabrication

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

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.

Un “ **mortier prédosé** ” 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.

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

- 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.
- Un “ **mortier allégé** ” (LW) est un mortier d'enduit performanciel dont la masse volumique durcie à l'état sec est inférieure à 1 300 kg/m³.
- Un “ **mortier d'enduit de parement** ” (CR) est un mortier d'enduit performanciel spécialement coloré, utilisé pour la couche de finition décorative.
- 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.
- 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.

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

impermeable 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 n°2 : 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	$C \leq 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Conductivité thermique	NF EN 1745	T1	$\lambda \leq 0,1 \text{ W/m.K}$
		T2	$\lambda \leq 0,2 \text{ W/m.K}$
Rétention d'eau	-	Faible	$Re < 86\%$
		Moyenne	$86\% \leq Re \leq 94\%$
		Forte	$Re > 94\%$

Source : Nouveau DTU 26.1 (avril 2008)

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 ($R_t \geq 0,8$ MPa) : blocs de béton courants, briques et blocs de terre cuite ;

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

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

Tableau n°3 : 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

Source : Nouveau DTU 26.1 (avril 2008)

1.3.2 PATHOLOGIE DES ENDUITS TRADITIONNELS

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 atmosphériques permet à la chaux, en solution dans l'eau de gâchage en excès, de migrer jusqu'à la surface de l'enduit.

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

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 (voir §d).

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 ;
- ✓ à 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.

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 ré humidification 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.

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'humidité³.

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

³ Dr. GHOMARI Fouad : « Pathologie des constructions », Université ABOUBEKR BELKAID – Département de génie civil, 1996, p.19

I.4 LES ENDUITS DANS LE CONTEXTE AFRICAIN

Il s'agit des enduits couramment utilisés en Afrique et qui relèvent des savoirs traditionnels ou ancestraux. L'aspect le plus remarquable et qui attire la curiosité est le fait que des produits comme le néré, le bitume ou encore le karité introduits dans la fabrication de ces enduits permettent de renforcer et de prolonger leur durée de vie.

I.4.1 SITUATION ET ENJEU

En Afrique, les enduits réalisés sont généralement à base de la terre à laquelle on ajoute des fibres végétales (pailles de blé, de riz, de mil, d'orge, etc.) ou animales (bouse de vache, crins d'animaux, etc.). Cependant la terre ne saurait constituer le composant de base d'un enduit extérieur de première qualité, surtout dans des environnements pluvieux, sans être améliorée par l'apport d'un adjuvant stabilisateur.

Les enduits de terre, employés en intérieur comme en extérieur, sont d'une adhérence quasiment parfaite mais constituent avant tout une couche d'usure qui sera la première affectée d'érosion et qui pourra être remplacée à l'économie. Une simple imprégnation, un badigeon ou un coulis, une peinture, peuvent considérablement améliorer ces enduits au demeurant fragile.

Cependant, l'adjonction des produits stabilisants qui améliorent la performance ou la durabilité, est un atout majeur de l'enduit traditionnel africain. Il est donc intéressant dans ce contexte que des études soient menées sur ces produits pour confirmer leur utilisation sur une plus grande échelle des constructions de nos jours.

I.4.2 LES AGENTS STABILISATEURS

a. Les stabilisants naturels utilisés

Ils sont très divers et souvent employés par coutume dans de nombreux pays. Leurs efficacités sont très variables ; ils agissent plus comme des ralentisseurs de la dégradation du matériau et limitent les réfections. Les stabilisants classiques utilisés sont : le jus de cactus agave ou de *cactus opuntia*, le beurre de karité fondu souvent ajouté de gomme arabique, le jus de tiges de bananier bouillies, 15 litres de farine de seigle bouillis dans 220 litres d'eau puis la pâte obtenue est ajoutée à la terre, la bouse de vache ou le crottin de cheval, la gomme arabique qui forme avec l'eau des colloïdes, la sève des fruits de l'acacia scorpioïde (gonakié) qui est bouillie dans de l'eau avec quelques pierres de limonite (sous-espèce de latérite) et qui

donne un tannin hydrofuge assez efficace, le néré en jus obtenu par décoction de la poudre des fruits ajouté à la terre puis repassé en badigeon sur la couche d'enduit de terre stabilisée au néré, le savon de peulh qui est une sorte de caséine délayée et battue comme une pâte.

D'autres produits naturels ont été testés par le centre de Cacavelli du Togo pour améliorer les enduits : l'huile de kapok obtenue par torréfaction des graines de kapok sous forme de poudre concentrée en lipides. La poudre est ensuite délayée dans l'eau et bouillie plusieurs heures. Le mélange à la terre est d'abord réalisé à sec puis on ajoute l'eau de gâchage. Le mur enduit est badigeonné de deux couches d'huile de kapok. Le palmitate de calcium, obtenu à partir d'un mélange de chaux grasse et d'acide palmitique (produit de la réaction de HCl sur une solution de savon indigène : l'akoto). Le palmitate de calcium est délayé dans un petit volume d'eau et le gâchage avec la terre se fait avec le lait de chaux (10% du poids du mélange). Chez les Hanza d'Afrique, on a pu constater l'emploi de potasse naturelle extraite des fosses à teinture, ou d'infusion de gousse de caroubier, ou même de mimosa que les plus riches importaient d'Egypte. Il existe sans doute de très nombreux autres stabilisants naturels.

b. Stabilisation au bitume

Les terres stabilisées au bitume ne sont ni trop argileuses ni trop sableuses et pulvérisées. La quantité de bitume varie de 2 à 6%. Ce sont généralement des cut-backs qu'il faut préalablement chauffer sans trop élever la température (max. 100°C). Dans le cas d'emploi d'émulsions bitumineuses, le mélange doit être pratiqué lentement afin de ne pas provoquer une rupture de l'émulsion. On observe des excellents résultats de ce genre d'enduits sur les façades du palais royal du *Na-Yiri de Kokologho* (Burkina Faso, photo).

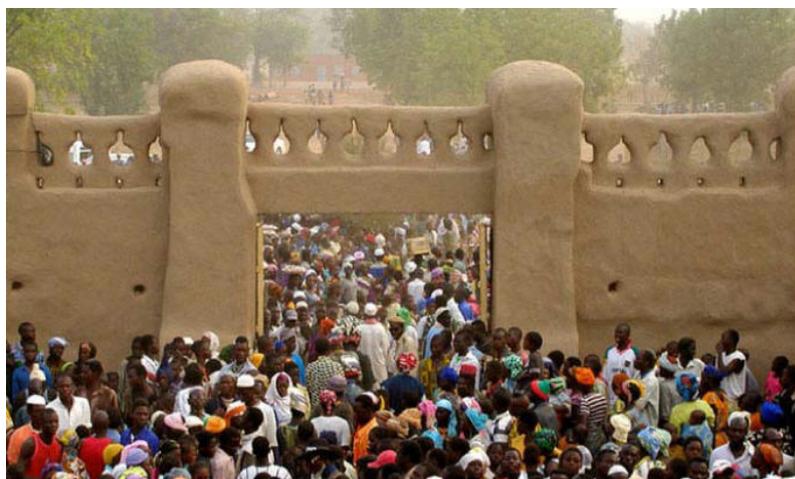


Photo n°1 : Palais royal du Na-Yiri de Kokologho (Burkina Faso)



CHAPITRE II : PROBLEMATIQUE DES ENDUITS TRADITIONNELS

Dans ce chapitre, l'accent sera mis sur la problématique de l'étude des enduits traditionnels. D'abord, le problème des enduits sera exposé pour orienter l'étude, puis les objectifs poursuivis seront précisés et, enfin pour atteindre ces objectifs quelques hypothèses de travail seront formulées.

II.1 ENONCE DU PROBLEME

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 (architecte, ingénieur, technicien de bâtiment, etc.). Les constructions auraient beau être réalisées selon toutes les règles de l'art mais la défaillance observée au niveau de l'enduit enlève 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, esthétique avec une originalité impressionnante à l'habitat. Le rôle protecteur dévolu aux enduits et aux dispositions constructives reste encore un défi au regard des changements climatiques que notre environnement est en train de subir mais aussi de la situation économique difficile de nos jours. Les dispositions constructives sont à quelques variantes près les mêmes pour toutes les techniques constructives (maçonnerie à base de ciment, adobe, bauge, terre façonnée, ...). Par contre, les enduits traditionnels sont diversement utilisés sur les architectures.

Aujourd'hui avec l'avancé technologique dans la production des matériaux, la réalisation des enduits requiert de plus en plus des techniques et d'outils de fabrication et de mise en œuvre adaptés à chaque type de cas. La tendance à la généralisation des expériences de réalisation des enduits d'un milieu à un autre conduit souvent à des résultats mitigés.

Face à tous ces facteurs (environnementaux, techniques, économiques) qui posent de grands problèmes quant à la prédiction de la durabilité des enduits, il vient tout naturellement

les interrogations suivantes : Quelles sont alors les bonnes manières pour procéder à la fabrication des enduits traditionnels ? Comment et avec quels matériels peut-on aboutir à une bonne exécution des enduits ? Quelles sont les caractéristiques de l'enduit qu'il faut prendre en compte pour prédire sa durabilité ? Et enfin, les savoirs traditionnels africains améliorent-ils de manière efficace la durabilité des enduits ?

La réponse à ces questions a été la préoccupation majeure tout au long de ce travail. Ainsi, pour mener à bien l'étude de cette problématique, plusieurs objectifs ont été fixés et quatre axes de recherche définis.

II.2 OBJECTIFS ET HYPOTHESES

II.2.1 OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'objectif général de notre étude est de déterminer les caractéristiques à prendre en compte pour prédire la durabilité des matériaux obtenus.

La réalisation de cet objectif est envisagée à travers trois objectifs spécifiques majeurs à savoir :

- ◇ analyser les techniques de fabrication et de mise en œuvre des enduits traditionnels ;
- ◇ tester expérimentalement la durabilité des matériaux obtenus ;
- ◇ interpréter les résultats des essais réalisés.

Pour atteindre ces objectifs, des hypothèses, à valider ou infirmer, sont définies.

II.2.2 HYPOTHESES DE L'ETUDE

Les quatre hypothèses suivantes fixent le cadre de ce travail :

- ✓ la première soutient que la mauvaise fabrication et mise en œuvre des enduits est une cause des désordres ;
- ✓ la deuxième retient que la résistance mécanique des enduits ne dépend pas seulement du liant ;
- ✓ la troisième affirme que les enduits sont invulnérables aux attaques des milieux agressifs ;
- ✓ la quatrième assure que les enduits traditionnels sont peu sensibles aux variations dimensionnelles et pondérales.

DEUXIEME PARTIE :

ENDUITS

TRADITIONNELS



CHAPITRE III : TECHNIQUES DE FABRICATION ET DE MISE EN ŒUVRE

III.1 LES ELEMENTS DE CONSTITUTION DES ENDUITS

III.1.1 LES LIANTS MINERAUX

Tous les ciments Portlands (CEM I et CEM II suivant la notation européenne et respectivement, CPA et CPJ suivant l'ancienne notation française), les ciments à maçonner, les chaux hydrauliques ou aériennes éteintes peuvent être utilisés pour la réalisation des enduits traditionnels.

Tableau n°4 : Liants minéraux utilisés pour la fabrication des enduits traditionnels

Matériau	Norme	Remarques
Ciments courants	EN 197-1	Tous les types ne seront adaptés à chaque cas de mise en œuvre
Chaux de construction	EN 459-1	
Chaux hydraulique	EN 459-1	
Ciments à maçonner	EN 413-1	

Source : NF EN 13914.1_novembre 2006

III.1.2 LES SABLES

Le sable doit être sain, siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable (norme P18-597). L'indice fourni par cet essai (PS) doit être supérieur à 60 ou 65⁴.

Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 3 mm.

⁴ CIMBETON : Centre d'Information sur le Ciment et ses applications, fiches techniques nouvelle édition 2001, 212p, p36

En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liants par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0 à 20%) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m³ de sable soit modifié ; c'est le phénomène bien connu du « foisonnement » du sable.

III.1.3 LES ADJUVANTS

Il peut s'avérer intéressant d'ajouter un adjuvant au mortier si celui-ci, malgré toutes les précautions prises, n'est pas suffisamment maniable. On utilise alors un plastifiant ou un entraîneur d'air. On utilise un hydrofuge de masse pour diminuer la capillarité et améliorer l'imperméabilité de l'enduit.

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 latis. De plus, les adjuvants ne doivent pas modifier, autrement que dans le sens recherché, la prise ou le durcissement du liant.

Tableau n°5 : Effet de type d'adjuvant sur le mortier

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 tout en étant anti-poussière
Hydrofuge ou imperméabilisant	Imperméabilise le mortier
Plastifiant	Donne une consistance plus liquide (sans ajout d'eau) pour faciliter la mise en œuvre

Source : Site de conseils de constructions – www.leroymerlin.fr

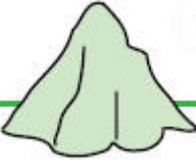
III.1.5 L'EAU DE GACHAGE

L'eau remplit un double rôle: elle sert à hydrater le ciment, et, ce qui est plus important, elle contribue à son ouvrabilité. Il convient de noter que les exigences relatives à l'eau de gâchage diffèrent beaucoup pour les mortiers et le béton. Dans le cas du béton, un faible rapport eau-ciment est préférable. Les mortiers doivent contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale. L'eau doit être propre et ne pas contenir de produits nocifs tels que des acides, des alcalis ou des matières organiques. Lorsqu'elle est potable, on peut l'utiliser.

III.2 TECHNIQUES DE FABRICATION

III.2.1 LE DOSAGE DU MORTIER

Les constituants les plus courants pour la confection du mortier d'enduit sont :

<p><u>LIANT</u> Ciment</p>	<p><u>AGREGAT</u> Sable sec de construction</p>	<p><u>EAU</u> Gâchage</p>	<p><u>CHAUX</u> Un ajout de chaux permet d'obtenir un mortier bâtard d'une grande plasticité</p>
			

Les différents mortiers d'enduit qu'on peut obtenir avec ces matériaux sont :

1. Le mortier de ciment : le plus résistant, imperméable, avec prise rapide ;
Dosage = ciment + sable + eau.
2. Le mortier de chaux : facile d'emploi, perméable, moins résistant que le mortier de ciment, aspect plastique et gras, s'utilise essentiellement comme enduit de finition ;
Dosage = chaux + sable + eau.
3. Le mortier bâtard : équilibre les qualités et les défauts des autres mortiers (un excès de ciment augmente la résistance ; d'avantage de chaux facilite sa mise en œuvre) ;
Dosage = ciment + chaux + sable + eau.

Les résistances mécaniques du mortier de chacune des couches constituant l'enduit doivent être dégressives, la plus forte étant donnée au gobetis. Cette exigence conduit à un dosage en liant également dégressif pour les trois couches.

Les dosages des liants que l'on peut préconiser pour des travaux courants sur maçonnerie ou sur béton sont donnés dans les tableaux suivants mais à titre indicatif.

1. Dosage liant par m³ de sable sec

Tableau n°6 : Principales caractéristiques des enduits traditionnels

ENDUITS TRADITIONNELS				
Couches	Caractéristiques			
	Fonction	Ordre de pose	Epaisseur	Dosage liant /m ³ de sable sec
Gobetis	Accrochage	1 ^{er}	3 à 5 mm	500 – 600 kg de ciments
Renformis	Planéité, imperméabilisation	2 ^{ème}	15 à 20 mm	350 – 450 kg de ciments + chaux
Finition	Décoration, protection	3 ^{ème}	5 à 7 mm	250 – 350 kg de chaux

Source : Extrait du DTU 26.1

2. Dosage liant pour un m³ d'enduit

Tableau n°7 : Dosage liant pour un m³ d'enduit

ENDUITS DE FACADE TRADITIONNELS : Dosage pour un m ³ d'enduit										
Couches	Dosage du liant dans le mélange		Ciment Portland Densité = 2,2		Chaux Densité = 1,2		Sable fin 0/2 Densité = 1,5		Eau	Surface réalisée
	Kg/m ³	Obs.	Kg	Litre	Kg	Litre	Kg	Litre	Litre	m ²
1 ^{ère} couche : Gobetis de 3 à 5 mm	450		450	205			1760	1100	240	200
2 ^{ème} couche : Corps d'enduit de 15 à 20 mm	450	Bâtard	300	135	150	125	1760	1100	225	84
3 ^{ème} couche : Finition de 5 à 7 mm	300		300	135			1920	1200	175	125

3. Dosage liant pour la réalisation d'une surface de 20 m²

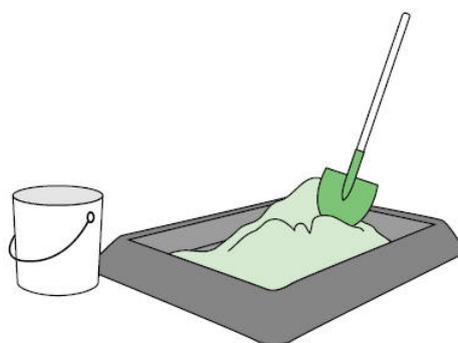
Tableau n°8 : Dosage liant pour la réalisation de 20 m² d'enduit

Enduit traditionnel		Ciment	Chaux	Sable fin Granulométrie : Type 0/2 mm Densité 1,5 t/m ³	Sable à maçonner Granulométrie : Type 0/5 mm Densité 1,5 t/m ³	Eau	Nature du mélange à obtenir
	<u>Première couche</u> Gobets : 3 à 5 mm	50 kg		150 kg soit 100 litres		25 litres	Presque liquide
Enduit bâtarde	<u>Deuxième couche</u> Corps d'enduit : 15 à 20 mm	100 kg	50 kg		690 kg soit 460 litres	75 litres	Pâte onctueuse et plastique
	<u>Troisième couche</u> Finition : 5 à 7 mm	20 kg	20 kg	175 kg soit 117 litres		10 litres	Pâte onctueuse

III.2.2 REALISATION 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.



III.2.3 REALISATION MECANIQUE 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 10 litres d'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 2 litres d'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.



III.3 TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE

III.3.1 PREPARATION 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 MATERIELS ET TECHNIQUES D'EXECUTION

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 donne l'aspect projeté-écrasé à l'enduit ;
3. Le Rouleau mousse alvéolé ou Feuille de chêne : permet de faire une finition tramée de l'enduit ;
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

Couche d'accrochage ou gobetis

Il est réalisé sur la maçonnerie bien sèche (3 semaines minimum). Le gobetis doit avoir une consistance de crème liquide ou de "soupe".

Il est projeté à la truelle avec des coups secs et réguliers afin de couvrir le maximum de surface en peu d'épaisseur (environ 5 mm). Après projection et en début de séchage, il peut s'avérer important de surfacer le parement enduit avec une latte de bois pour enlever les surépaisseurs ponctuelles éventuelles mais la surface doit restée toujours très rugueuse. Cette opération permet de limiter l'épaisseur de la couche suivante. La projection peut se faire au sablon (compresseur pour la production d'air comprimé), éventuellement à la tyrolienne.

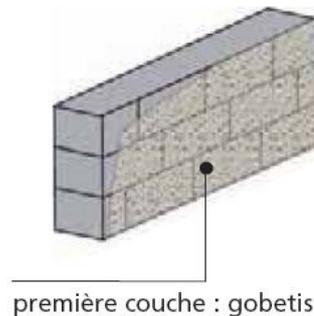


Figure n° 2 : Principe d'exécution de la première couche (gobetis)

Corps d'enduit ou renformis

Trois jours minimum après le gobetis, dans des conditions atmosphériques clémentes (température supérieure ou égale à + 8°C et inférieure à + 30 °C, temps sec et faiblement ventilé) ou délai prolongé en cas de mauvais temps, on pourra exécuter cette deuxième couche appelée corps d'enduit ou renformis, après avoir ré humidifié le gobetis qui ne doit pas être ruisselant. Le mortier du corps d'enduit, quelle que soit sa composition, aura une consistance plastique, telle que ce mortier pris et serré dans la main se mette facilement en boule en laissant suinter l'eau légèrement. Il sera le même pour lier les matériaux de reprise de la maçonnerie, pierres, moellons, briques ou agglomérés, de même que pour le regarnissage des joints. Le mortier du corps d'enduit sera appliqué sur le support Gobetis ré humidifié, comme dit plus haut en un ou deux passes selon le mode d'application. L'épaisseur devra être la plus régulière possible de l'ordre de 1,5 cm à 2 cm.

Cette couche sera serrée à la taloche et sa surface laissée rugueuse pour accrocher l'enduit de finition. Dans la mesure du possible, les mortiers de chaux hydraulique naturelle ne

seront utilisés qu'un quart d'heure à une demi-heure après gâchage, ce qui permettra une meilleure tenue du mortier sur le support et diminuera la fissuration après serrage à la taloche.

Dans le cas d'épaisseurs supérieures à 3 cm, la pose d'un grillage galvanisé sera nécessaire. Celui-ci devra être fixé mécaniquement à la paroi avec 5 points d'ancrage au mètre carré ; les bandes de grillage devront avoir un recouvrement d'au moins 10 cm. Des renforts devront être placés en diagonale dans les coins, au niveau des ouvertures. Les surfaces maximum enduites ne devront pas dépasser 20 m². Dans le cas contraire, des joints de fractionnement devront être posés dans toute l'épaisseur de l'enduit (finition comprise).

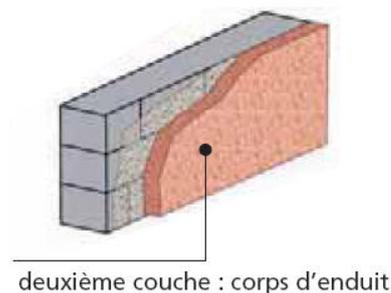


Figure n°3 : Principe d'exécution de la deuxième couche (corps d'enduit)

Enduit de finition ou couche décorative

Quelle que soit la nature de la maçonnerie constitutive du mur de la façade, c'est celle de la deuxième couche, corps d'enduit ou renformis qui déterminera le choix du liant ou de mélange de liants qui servira à composer le mortier de la troisième et dernière couche, appelée enduit de finition ou couche décorative. Ces enduits seront appliqués sur corps d'enduit ou renformis exécutés depuis au moins quatre (04) jours suivant la nature de ce dernier, dans des conditions atmosphériques normales. Le support devra être convenablement humidifié, mais non ruisselant lors de l'exécution de l'enduit de finition.

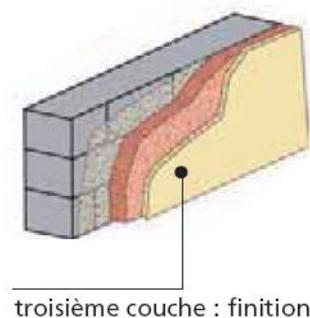


Figure n°4 : Principe d'exécution de la troisième couche (finition)

Enduit multicouche projeté mécaniquement

L'enduit traditionnel peut aussi être réalisé en deux couches lorsque le mortier est projeté mécaniquement (machine à projeter, pot de projection).

La première couche assure l'adhérence de l'enduit au support et l'éventuel rattrapage des irrégularités, elle a une épaisseur de 10 à 15 mm. La seconde couche donne sa forme définitive à l'enduit et complète la fonction imperméabilisation. Son épaisseur est de 8 à 12 mm. Le mortier est serré énergiquement à la taloche.

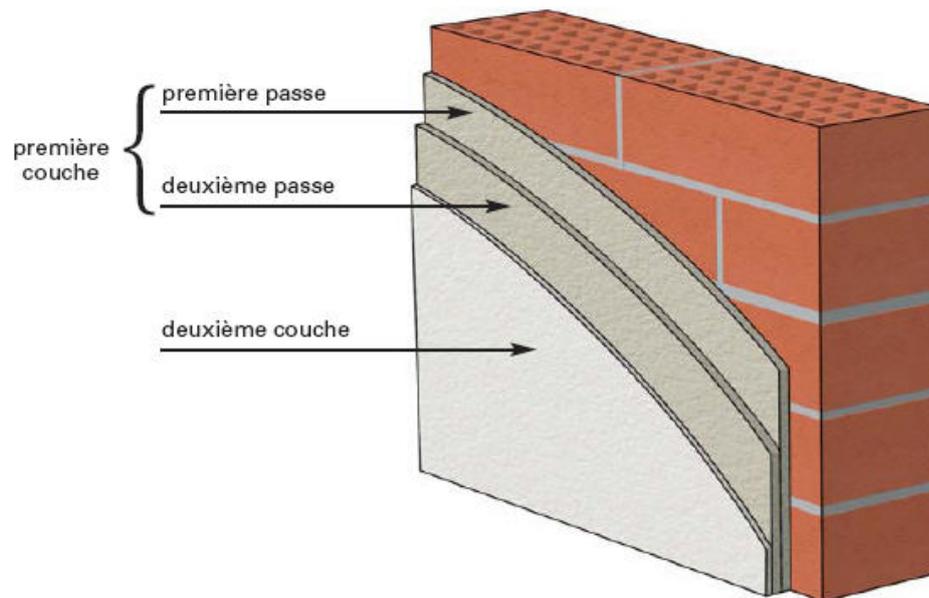


Figure n°5 : Principe d'exécution de l'enduit multicouche

L'application par projection mécanique apporte un meilleur accrochage au support et permet la réalisation en deux couches au lieu de trois. Ces enduits s'appliquent sur maçonnerie.

Au vu de cette étude sur les techniques de fabrication et de mise en œuvre des enduits traditionnels, il ressort donc que la mauvaise méthode de fabrication et de mise en œuvre peut être la cause directe de dommage des enduits réalisés. A ce niveau, la première hypothèse semble être confirmée.



CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a pour but d'évaluer quelques indicateurs de durabilité du mortier d'enduit réalisé. Les indicateurs de durabilité retenue pour cette étude sont : la performance mécanique, la résistance à l'agression chimique et la stabilité volumétrique de l'enduit. Ainsi dans ce chapitre, une attention particulière sera accordée à la description de la méthodologie d'étude et les résultats des tests réalisés feront l'objet d'interprétation pour la caractérisation de l'enduit traditionnel.

IV.1 METHODOLOGIE D'ETUDE

IV.1.1 CHOIX DES MATERIAUX

L'intérêt pour cette partie est de chercher à réaliser un enduit traditionnel plus durable en comparaison avec les caractéristiques du mortier normal de référence réalisé et testé également. C'est dans cette optique que le néré, réputé être un agent de renforcement de durabilité des enduits traditionnels africains, a été choisi pour être testé.

Les éléments utilisés sont donc le ciment portland CEM I 45 (de la marque *Diamond Cement*), le sable fin à moyen (80 μ m à 2mm), l'eau potable et une solution de Néré (de son nom scientifique le *Parkia biglobosa*) dosée à 180g/l.

IV.1.2 COMPOSITION DES MELANGES A REALISER

Les mélanges à réaliser pour les essais sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Ils sont préparés et mélangés conformément à l'EN 1937.

Tableau n°9 : Composition des mélanges à réaliser

Mélange	Matériaux			
	Ciment	Sable	Eau	Solution de néré
M1	X	X	X	
M2	X	X		X

IV.1.3 CONFECTION DES EPROUVETTES

Les éprouvettes des différents mortiers d'enduit pour l'essai sont confectionnées selon les méthodes de l'EN 196-1. Notation : **MR = mortier de référence**, **MN = mortier au néré**.

Tableau n°10 : Dosage des mélanges à réaliser

Mélange	Ciment	Sable 0/2	Eau	Solution de Néré
MR	450g	1350g	225ml	
MN				225ml
Rapport E/C	0,5			

Pour chaque mélange, des moules normalisés permettent de réaliser simultanément trois éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm × 4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés "éprouvettes 4 × 4 × 16"). Un appareil à chocs (NF EN 196.1) permet d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde.

24 heures après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 C° ± 1 C° jusqu'au moment de l'essai de rupture. Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

IV.1.4 DURABILITE DES ENDUITS

L'étude de durabilité dans ce contexte a pour objectif d'évaluer quelques caractéristiques principales des mortiers que sont :

- ✓ les performances mécaniques ;
- ✓ les résistances aux agressions chimiques ;
- ✓ la stabilité volumétrique (absorption d'eau, variations dimensionnelles), etc.

VI.1.5 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

a. Performances mécaniques

Les essais sont effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4 x 4 x 16 cm conservés dans l'eau à 20 °C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances des mortiers d'enduit (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- nature et dosage en ciment (ciment portland CEM I – 45) ;
- rapport E/C (dans notre cas E/C = 0,5) ;
- granulométrie et nature du sable (sable fin à moyen) ;
- énergie de malaxage et mise en œuvre (malaxeur normalisé) ;
- protection les tous premiers jours (conservation à ± 30 °C).

Résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction par flexion est effectuée à l'aide d'un appareillage spécial pourvu d'un dispositif de flexion par trois points tels que schématisés sur les figures ci-dessous. La résistance est calculée selon la formule :

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / b^3$$

Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions $b = 40$ mm et $l = 100$ mm, si F_f est exprimée en newtons (kN), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_f \text{ (MPa)} = 2.34375 \times F_f \text{ (kN)}$$

Les résultats d'essai sont exprimés comme la moyenne arithmétique de trois déterminations de la résistance à la flexion et des trois valeurs individuelles.

Si un des résultats des trois déterminations varie de plus de 20 % par rapport à la moyenne, l'essai doit être répété avec de nouvelles éprouvettes.

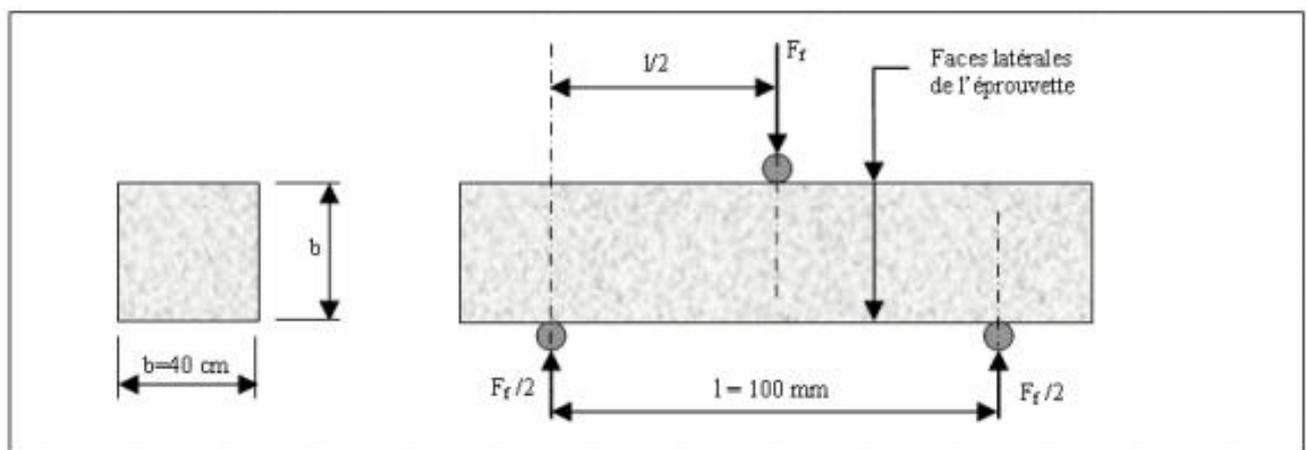


Figure n°6 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion

Résistance à la compression

Les essais sont effectués selon la norme NF P15-451. Les demi-prismes obtenus après rupture en flexion de l'éprouvette ont été rompus en compression au moyen de la presse d'écrasement. La résistance est calculée selon la formule :

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

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 :

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

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes sont arrondis à 0,05 MPa près et on en fait la moyenne (retenue à 0,1 MPa près). Si l'un des 6 résultats diffère de ± 10 % de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de ± 10 % de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée. Auquel cas il convient de chercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conservation ?

Lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.

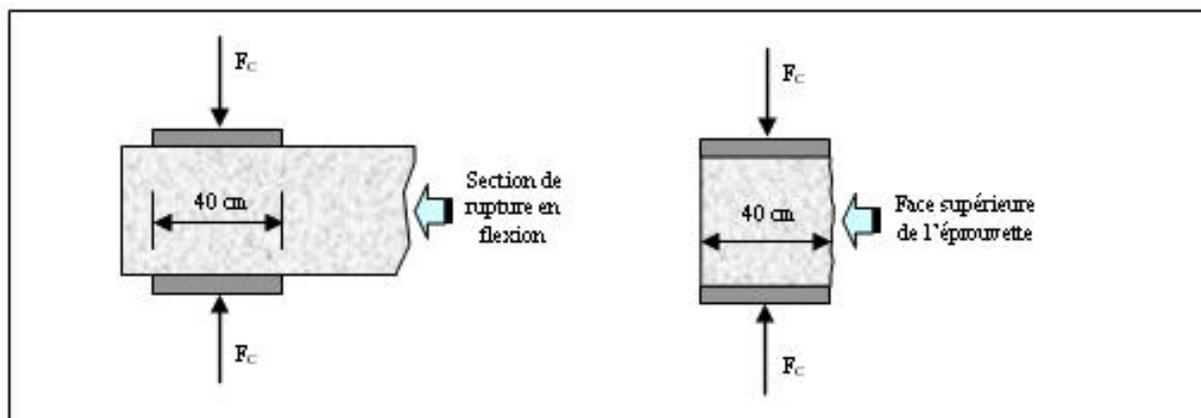


Figure n°7: Dispositif de rupture en compression

b. Résistance aux agressions chimiques

Pour l'essai de résistance aux milieux agressifs, les solutions chimiques suivantes ont été retenues :

- ✓ **Sulfate de sodium** : les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'ettringite secondaire et le gypse. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations⁵. Les sulfates se retrouvent fréquemment dans les sols et les eaux des milieux agraires ;
- ✓ **Chlorure de magnésium** : un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau (eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.). Ces milieux peuvent contenir des ions agressifs tels les chlorures. La plupart du temps, les attaques chimiques surviennent lorsque les agents agressifs s'associent avec l'eau pour former une solution agressive qui peut pénétrer le béton (tout en entraînant d'autres substances corrosives: ions)⁶.

Le choix de ces solutions chimiques se justifie donc par le fait que les constructions en milieu agricole (cultures ou jardin autour des maisons) et les constructions soumises aux intempéries (pluie, vent humide, etc.) sont courantes en Afrique. L'agressivité de ces solutions sur le ciment a été mise en évidence par plusieurs recherches, notamment celle de DOUGLAS E.⁷ et de VERBECK, G.J.⁸.

Après 24h de cure sous l'eau, les spécimens de mortiers sont immergés dans les solutions de sulfate de sodium (Na_2SO_4) et de chlorure de magnésium (MgCl_2) à 5% de concentration chacune. La variation du poids des éprouvettes est examinée après 2, 7, 14 et 21 jours. Après attaque, les parties altérées du mortier sont nettoyées avec de l'eau, puis sont séchées pendant une demi-heure selon la norme ASTM C267-96 « Résistance des mortiers aux produits chimiques », et enfin la résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte en masse des éprouvettes :

$$\text{Perte en masse (\%)} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100$$

Avec m_1 et m_2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

⁵ Université de Sherbrooke : GCI 714 – Durabilité et réparations du béton

⁶ Baron, J. et Ollivier, J.-P. 1992 La durabilité des bétons, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, Paris, France 450 p.

⁷ DOUGLAS E. (1989) : « Mortier de ciments au laitier et béton de laitier : caractéristiques de durabilité », Matériaux complémentaire en cimentation CANMET V.M Malhotra éditeur, p 373 – 411

⁸ VERBECK G. J. (1968) : « Field and laboratory studies of sulfate resistance of concrete, PCA Research Department Bulletin 227, 113 – 124

c. Stabilité volumétrique

La mesure de l'**absorption d'eau par capillarité** et des **variations dimensionnelles et pondérales** sont effectuées sur les éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16) cm, pour chacune des deux formulations des mortiers. Les éprouvettes sont testées aux 2, 7, 14 et 21 jours d'âge.

L'absorption d'eau par capillarité

L'essai est effectué à température « régulée » du laboratoire, sur trois demi-prismes (éprouvettes 4 x 4 x 16 cm après essai de flexion) conformément au §8 de la norme NF EN 1015-18 - *Détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci*.

Les éprouvettes sont immergées par leur base rompue par flexion 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 rompue.

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. Les éprouvettes sont pesées M_1 et replacées dans le récipient. Après 90 minutes, l'opération est répétée et les éprouvettes sont pesées à nouveau M_2 .

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

$$W = 0,1 (M_2 - M_1) [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{min}^{0,5})]$$

Les variations dimensionnelles et pondérales

L'essai est effectué sur trois éprouvettes de dimensions 4 x 4 x 16 cm munies de dispositifs de mesure aux extrémités. Dès le démoulage (24 heures après fabrication), la distance entre les extrémités est déterminée et les éprouvettes sont pesées. Les mêmes mesures sont effectuées après 2, 7, 14 et 21 jours de séchage en ambiance à $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ et $(50 \pm 5)\%$ HR, les éprouvettes étant stockées sur chant.

Notons ici que pour des difficultés techniques de mesures, seules les mesures de variations pondérales ont été effectuées.

IV.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Note sur les instruments de mesures utilisés et les conditions de réalisation des essais.

- Balance électronique SEDITECH : capacité maxi 6kg, précision 0,1g avec fonction Tare ;
- Malaxeur électrique HOBART avec défaut de fixation de la cuvette de malaxage ;
- Le Compacteur à chocs automatique est tombé en panne pendant le moulage des six dernières éprouvettes des mortiers au néré ;
- La Presse pour test de résistances mécaniques n'est pas automatique comme décrit dans les normes. Les charges appliquées manuellement aux éprouvettes sont non constantes ;
- L'humidité relative du laboratoire n'a pas été vérifiée pendant les essais. Les normes précise d'avoir une HR = $\pm 50\%$;
- La température de l'eau où sont immergées les éprouvettes est de ± 30 °C. Les normes recommandent 20 ± 1 °C.

IV.2.1 PERFORMANCES MECANIQUES

a. Résistance à la traction par flexion

Tableau n°11 : Résultats des essais de traction par flexion

Résistance à la traction par flexion Rf (MPa)				
Type de mortier	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	1,0	1,4	1,9	2,5
MN	0,4	0,9	1,5	2,2

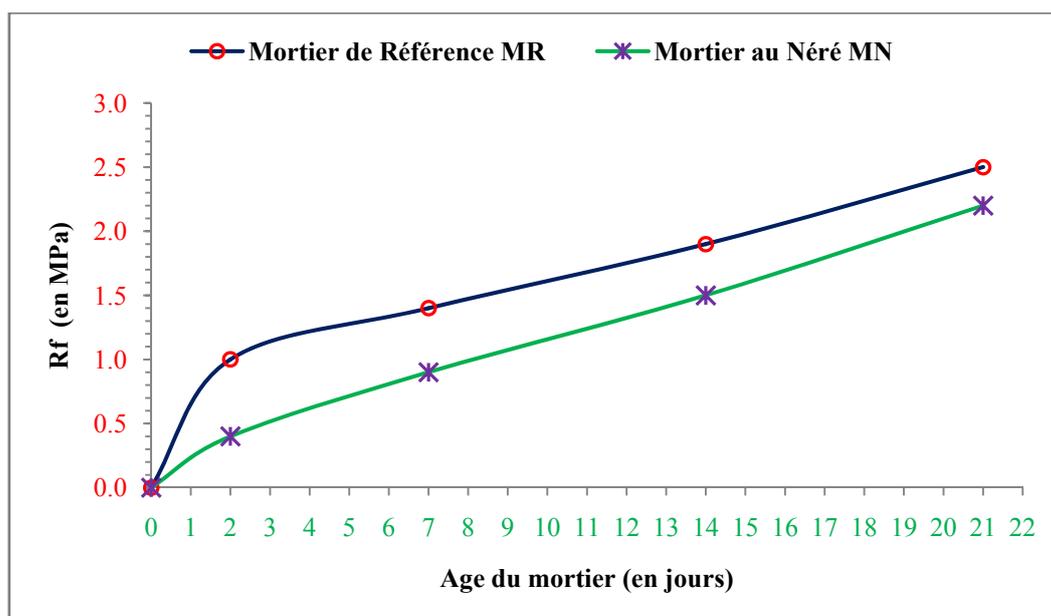


Figure n°8 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers étudiés

b. Résistance à la compression

Les résistances à la compression R_c (MPa) des mortiers testés à différents âges se présentent comme suit :

Tableau n°12 : Résultats des essais de compression

Résistance à la compression R_c (MPa)				
Type de mortier	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	1,2	1,8	2,8	4,2
MN	0,6	1,3	3,0	5,3

Le graphe de la figure 9 illustre l'évolution de la résistance à la compression des mortiers issus de l'essai de traction par flexion.

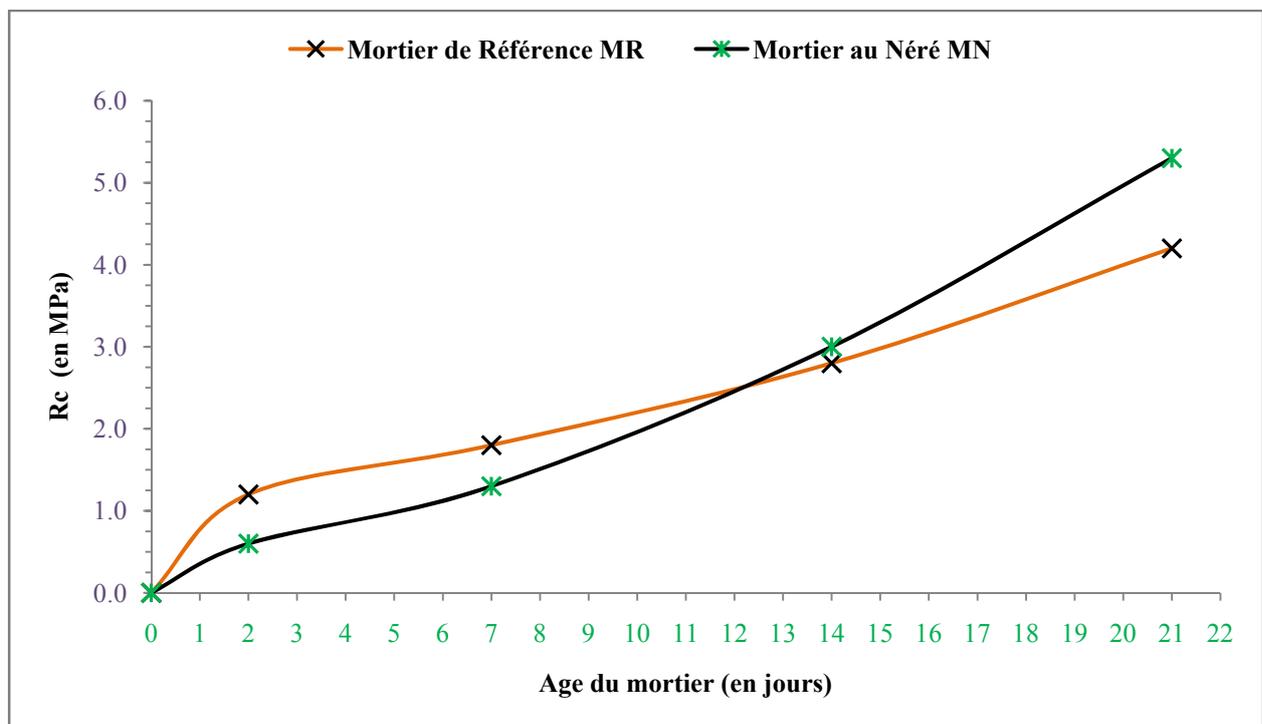


Figure n°9 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés

L'analyse des figures (8 et 9) permet d'apporter les commentaires suivants :

D'abord, nous remarquons une augmentation continue de la résistance à la flexion et à la compression pour les différents mortiers, en fonction de l'âge (2, 7, 14 et 21 jours). Cette augmentation est due à l'hydratation du ciment au cours du temps, ce qui provoque l'évolution de la compacité ; cependant :

1. En ce qui concerne la résistance à la flexion. (Tableau n° 12 et Figure n°8)
 - la résistance du mortier MN évolue presque comme une fonction linéaire du temps. On peut l'approcher par l'équation $R_f = 0,09 \times Age + 0,21$; Celle du mortier MR s'avoisine à une fonction logarithme du temps ;
 - la différence de la résistance entre les mortiers MR et MN est dégressive de l'ordre de 0,1MPa, du 2^{ème} au 21^{ème} jour de l'essai ; ceci montre que le mortier MN est certes moins résistant que le mortier MR mais développe une capacité d'acquisition de résistance plus rapide que ce dernier ;
2. En ce qui concerne la résistance à la compression. (Tableau n°13 et Figure n°9)
 - La résistance du mortier MR garde la même allure d'évolution que dans le cas de la résistance à la flexion ;
 - la résistance à la compression du mortier MN augmente au dessus de celle du mortier MR à partir de l'âge de 14 jours. Il faut noter que ce mortier MN testé à l'âge de 14 jours a subi un compactage manuel (panne du compacteur !) et ceci pourrait être la cause de cette augmentation de résistance. Dans le cas contraire, on dira alors que cette augmentation est due à la présence du néré qui favorise la cohésion des matériaux en présence après un temps de cure de 14 jours ;
 - la résistance à la compression du mortier MN reste supérieure à celle du mortier de référence jusqu'au 21^{ème} jour. Cependant nous pensons ici qu'une comparaison de leurs comportements à plus long terme pourrait permettre de tirer une conclusion plus avisée.

Au regard de ces résultats de résistance mécaniques des deux mortiers ayant le même dosage en liant (ciment), la différence des résistances observées ne dépend pas donc du liant seulement mais de tous les constituants. Dans ce contexte, la seconde hypothèse est validée.

c. Masse volumique apparente des mortiers

Les éprouvettes de 4cm x 4cm x 16cm donnent un volume de $V = 256 \text{ cm}^3$. Avant chaque essai les éprouvettes sont pesées pour la masse brute M. La masse volumique apparente est égale à $\rho = M / V$.

Tableau n°13 : Masse volumique apparente des mortiers étudiés

Age	2j	7j	14j	21j
MR : ρ_{MR} (Kg/m ³)	1911	1958	1960	1962
MN : ρ_{MN} (Kg/m ³)	1844	2059	2072	2067

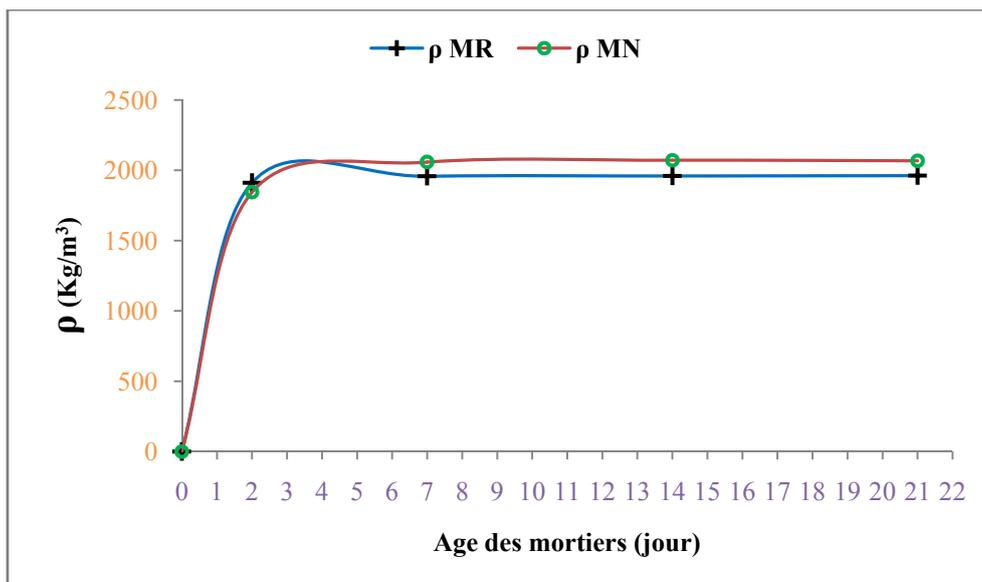


Figure n°10 : Evolution de la masse volumique apparente des mortiers étudiés

IV.2.2 RESISTANCE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES

a. Action de la solution de sulfate de sodium Na₂SO₄ à 5%

Tableau n°14 : Résultats des essais de résistance au sulfate de sodium à 5%

Perte de masse (%)				
Type de mortier	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	0	0,02	0,02	0,04
MN	0	0	0,01	0,02

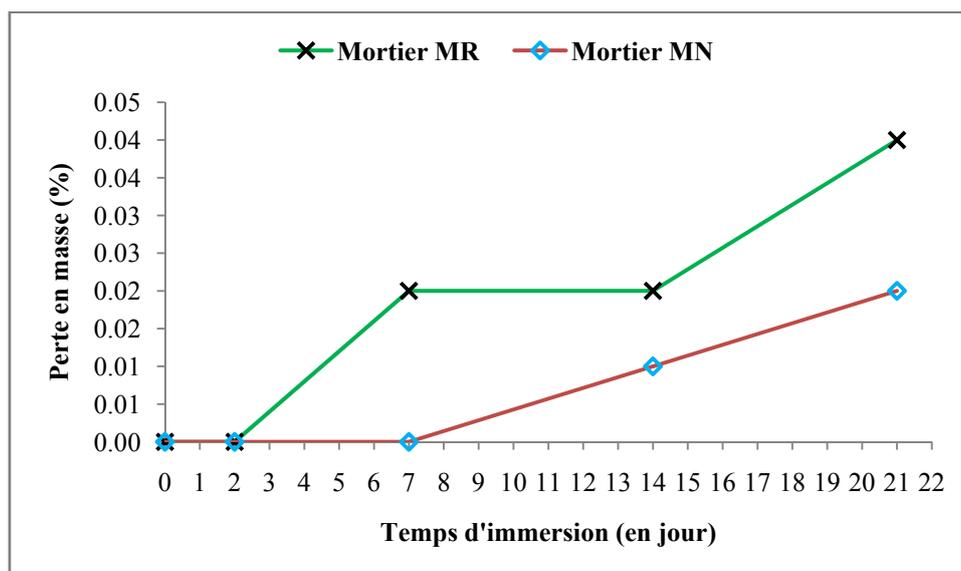


Figure n°11 : Evolution de la perte en masse par le Na₂SO₄ des mortiers étudiés

b. Action de la solution de chlorure de magnésium $MgCl_2$ à 5%

Tableau n°15 : Résultats des essais de résistance au chlorure de magnésium à 5%

Perte en masse (%)				
Type de mortier	2 jours	7 jours	14 jours	21 jours
MR	0	0,01	0,01	0,01
MN	0	0,01	0,02	0,02

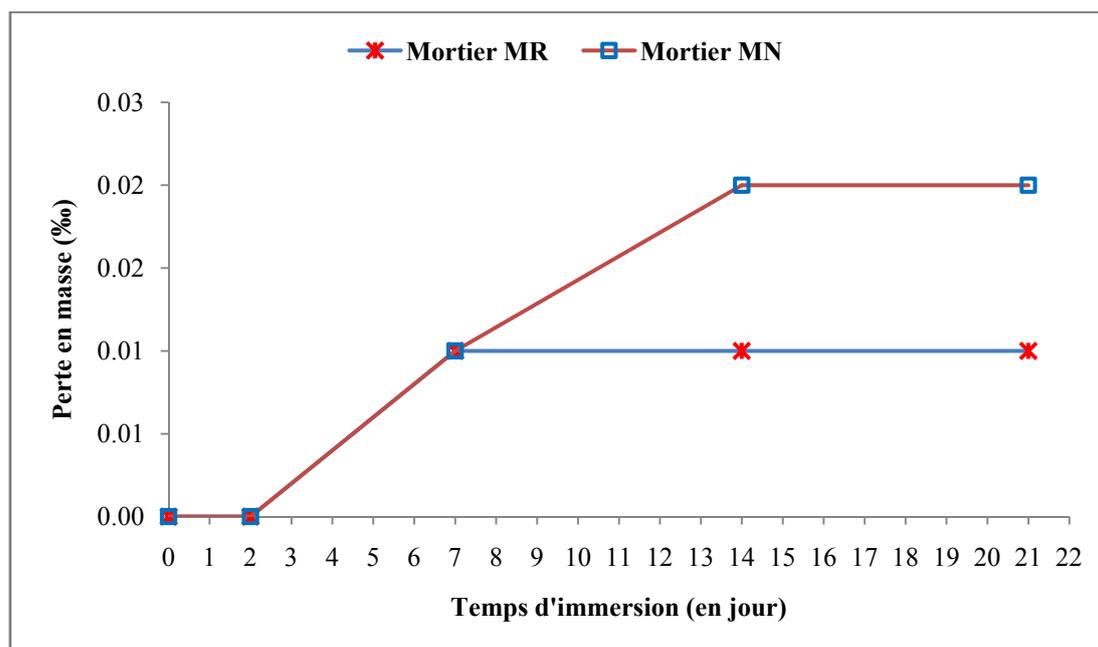


Figure n°12 : Evolution de la perte en masse par le $MgCl_2$ des mortiers étudiés

Après 24h jusqu'à 21 jours, les différents mortiers développent leurs aptitudes à résister aux attaques des solutions chimiques.

Les résultats montrent en premier lieu que les mortiers MN ont une résistance chimique à la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à 5% meilleure que celle des mortiers MR (figure 11). Nous pouvons observer pour le mortier MN un pourcentage en perte de masse relativement faible, cela serait dû à la présence du néré qui réduirait l'alcalinité du milieu cimentaire et favoriserait donc la stabilisation de la formation de l'hydroxyde de sodium (NaOH). La réaction chimique qui se produit sur la pâte cimentaire s'écrit :



Ca(OH)₂ : Portlandite (ou chaux hydratée) résulte de l'hydratation des constituants anhydres du ciment. La Portlandite et les aluminates sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque des sulfates ;

CaSO₄.2H₂O : gypse secondaire. C'est un produit expansif (départ des dégradations) qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté.

NaOH : hydroxyde de sodium, alcalinité élevée (stabilisation des C-S-H)

Comme dans cette réaction, l'expansion peut provenir aussi de la formation de l'ettringite secondaire à partir de l'aluminate tricalcique (3CaO, Al₂O₃) en abréviation C₃A :



La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation des cristaux très fins dont le volume molaire est de 3 à 8 fois supérieures au volume du solide initial⁹. Ce résultat s'apparente à celui de la recherche publiée par MEZGHICHE, 1994.

Notons par ailleurs que le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C₃A du ciment.

En revanche, les résultats obtenus pour le deuxième essai (figure 12) montrent que les mortiers MR ont une meilleure résistance chimique à la solution de chlorure de magnésium (MgCl₂) à 5% par rapport aux mortiers MN. Cela peut être dû au fait que dans les mortiers MN, à cause de la présence du néré, l'hydratation du ciment libèrerait une faible quantité de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) qui au contact du MgCl₂ libèrerait également peu de chlorure de calcium (CaCl₂) soluble et par conséquent une quantité plus importante de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)₂), tandis que dans les mortiers MR, l'hydroxyde de calcium serait consommé par une réaction pouzzolanique pour former à la fin de nouveaux hydrates stables (MEZGHICHE, 1994). La réaction chimique qui se produit est :



Les résultats du test d'agression chimique ont montré que tous les types d'enduits étudiés sont vulnérables aux attaques des milieux agressifs (soit au Na₂SO₄ ou soit au MgCl₂). La troisième hypothèse se trouve donc infirmée.

⁹ BARON, J. ET OLLIVIER J.-P. : « La durabilité des bétons », 1992, p166

VI.4.3 STABILITE VOLUMETRIQUE

a. Absorption d'eau par capillarité

Tableau n°16 : Résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité des mortiers

Type de mortier	Temps de pesage		Coefficient de capillarité W (Kg/m ² min ^{0.5})
	10min (masse M ₁)	90min (masse M ₂)	
Mortier MR	249,2	249,7	0,05
	366,3	366,7	
	157,9	158,5	
Mortier MN	184,6	185,5	0,07
	273,1	273,6	
	245,3	246,0	

b. Variations pondérales

Les mesures des variations pondérales se présentent comme suit.

Tableau n°17 : Résultats des variations pondérales des mortiers

Age des mortiers	Mortier MR		Mortier MN	
	Masse brute (g)	Taux de variation	Masse brute (g)	Taux de variation
2j	459,3		462,1	-
7j	458,4	- 0,20 %	459,9	- 0,48 %
14j	457,7	- 0,15 %	459,4	- 0,11 %
21j	457,2	- 0,11 %	458,5	- 0,20 %
		- 0,15 %		- 0,26 %

Les tests de l'absorption d'eau par capillarité effectués sur les spécimens conservés dans l'eau montrent que le mortier MN ($W = 0,07 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$) est plus apte à l'absorption d'eau que le mortier MR ($W = 0,05 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$). Ces deux mortiers ont de coefficient inférieur à $0,2 \text{ Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$ (faible capillarité), donc ils peuvent être réalisés sur des surfaces exposées à la pluie (DTU 26.1, avril 2008).

Quant aux tests de variations pondérales effectués à différents âges des spécimens, les résultats montrent là encore que le mortier MN connaît une plus forte diminution de son poids (- 0,26 % en moyenne) que le mortier MR (- 0,15 % en moyenne) sur les 21 jours de test.

Les résultats de ces tests de stabilité volumétrique permettent simplement d'invalider la quatrième hypothèse en disant que les enduits varient en poids lorsqu'ils absorbent de l'eau par capillarité. Cependant il faut noter que ces valeurs sont tout de mêmes faibles.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les enduits traditionnels jouent un rôle très important dans les constructions. Ils habillent les ouvrages en leur donnant esthétique et protection.

A travers notre étude, nous avons voulu analyser les techniques de fabrication et de mise en œuvre des enduits traditionnels et tester leur durabilité en se basant sur les essais de leurs résistances mécaniques, de leurs résistances aux milieux agressifs et de leurs variations dimensionnelles et pondérales. A l'issue de nos travaux de laboratoire qui ont porté sur l'essai de deux types d'éprouvettes de mortier d'enduits, on retiendra que :

- le mortier de référence MR est plus résistant à la flexion que le mortier au néré MN, tandis que la résistance à la compression du mortier au néré MN devient plus importante par rapport à celle du mortier de référence MR à partir du 14^{ème} jour de leur cure sous l'eau à la température de ± 30 °C ;
- le mortier au néré MN développe une résistance à l'agression de la solution de sulfate de sodium meilleure que le mortier de référence MR. En revanche, ce dernier est plus résistant à l'agression de la solution de chlorure de magnésium ;
- l'absorption d'eau par capillarité du mortier MR est plus faible que celle du mortier MN et la variation pondérale moyenne du mortier MN est supérieure à celle du mortier MR.

En matière de prédiction de la durabilité des enduits traditionnels, force est de constater que si les essais de laboratoire sont faits dans les conditions requises, la connaissance des caractéristiques des matériaux permet de faire un choix satisfaisant de l'enduit. Si au cours de notre étude il est apparu que certaines hypothèses de départ ne sont pas véritablement confirmées ou infirmées, cela est à mettre au compte des difficultés liées aux conditions de travail en laboratoire (manque ou panne des équipements de travail ou de mesure, non respect des conditions de température et d'humidité relative du laboratoire, substitution du matériel électronique par de la mécanique) et de l'organisation du stage.

Au-delà de ce qui précède, et pour enrichir davantage cette étude, nous souhaitons que des tests de durabilité soit réalisés sur d'autres matériaux (latérite, chaux, argile, etc.) avec de différentes concentrations en solution de néré et cela sur une plus longue période (au moins 28 jours) pour avoir une plus large connaissance des comportements de ces matériaux en corps d'enduit.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES GENERAUX

1. BAYOL, M.G. (1991), *Contribution à l'étude de l'influence de la succion sur le comportement des sols non saturés compactés*. DEA de Génie Civil ENTPE-INSA Lyon, France
2. GUICHART & VINCENT (1991), *les enduits adaptés à la terre*, travail de fin d'études ENTPE, 92p
3. LAURENT, J.P (1986), *contribution à la caractérisation des milieux poreux granulaires*, thèse de doctorat, IMG, Grenoble, France
4. M. OLIVIER : Laboratoire Géo matériaux de l'ENTPE, E.P du CNRS n° J 0160
5. PERA (1987), *Liants pouzzolanes de synthèse*. Rapport de recherche de l'INSA de Lyon, Laboratoire de Matériaux Minéraux, France

OUVRAGES ET REVUES SPECIALISES

1. BARON, J. ET OLLIVIER J.-P. (1992) : « *La durabilité des bétons* », Presses de l'École nationale des Ponts et chaussées, 453 p
2. BENOSMAN A. S. (2009) : « *Influence de l'ajout polymère sur la résistance des mortiers vis-à-vis d'une attaque chimique d'acide chlorhydrique* », résumé d'étude expérimentale, University of Oran, octobre, Extrait des pages 383 à 390
3. CSTB (1993) : « *Enduits monocouches d'imperméabilisation* » ; cahiers du CSTB 2669
4. MEZGHICHE B. (2009) : « *Etude de durabilité de mortier et de béton contenant de ciment avec ajout de laitier granulé et de sable de dune* », étude doctorale, résumé, ENSET Oran (Algérie), octobre, 8p
5. Mokhtaria BENKADDOUR, Fathia KAZI AOUAL (2009) : « *Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle* », Revue nature et technologie n°01/juin 2009, Extrait des pages 63 à 73
6. NF DTU 26.1 : « *Travaux de mortiers d'enduits* » ; Partie 1-1, 1-2, 2 ; Avril 2008, 13p

NORMES UTILISEES

1. EN 196-1, *Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques*, norme européenne, association française de normalisation, avril 2006.
2. NF EN 1937, *Méthode d'essai pour les mortiers de lissage et/ou de nivellement à prise hydraulique — Préparation des mélanges*, avril 2000, 13p
3. NF EN 13139, *Granulats pour mortiers*, janvier 2003, 41p
4. NF EN 13851, *Méthode d'essai pour les mortiers de lissage et/ou de nivellement à prise hydraulique – Détermination de la résistance à la flexion et à la compression*, mars 2004, 12p
5. NF EN 13872, *Méthode d'essai pour les mortiers de lissage et/ou d'égalisation – Détermination du retrait*, juin 2004, 16p
6. NF EN 13914-1, *Conception, préparation et mise en œuvre des enduits intérieurs et extérieurs – Partie 1 : enduits extérieurs*, novembre 2006, 60p
7. NF EN 15368, *Liant hydraulique pour applications non structurales – Définition, spécifications et critères de conformité*, mai 2009, 19p

CONSULTATIONS INTERNET

Ces sites internet ont été consultés dans la période de Février à Mai 2010.

1. www.afnor.fr
2. www.allislam.net_ciment
3. www.cstb.fr
4. www.techno-science.net

LES ANNEXES

A.	PERFORMANCES MECANIQUES	48
1.	RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION.....	48
a)	Résistance à la traction à 2 jours d'âge	49
b)	Résistance à la traction à 7 jours d'âge	49
c)	Résistance à la traction à 14 jours d'âge	50
d)	Résistance à la traction à 21 jours d'âge	50
2.	RESISTANCE A LA COMPRESSION	51
a)	Résistance à la compression à 2 jours d'âge	51
b)	Résistance à la compression à 7 jours d'âge	52
c)	Résistance à la compression à 14 jours d'âge	53
d)	Résistance à la compression à 21 jours d'âge	53
B.	RESISTANCE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES.....	55
1.	RESISTANCE AU SULFATE DE SODIUM A 5%	55
2.	RESISTANCE AU CHLORURE DE MAGNESIUM A 5%	55

A. PERFORMANCES MECANIQUES

Les essais sont réalisés sur les trois éprouvettes à différents âges après démoulage et conservation dans l'eau pendant 24 h.



Spécimen normal (Ciment + Sable + Eau)



Spécimen au Néré (Ciment + Sable + Néré)

Photo n°2 : Spécimens des mortiers pour les tests

1. RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION

Les trois éprouvettes prismatiques sont testées à la traction par flexion comme sur la photo n°2.



Photo n°3 : Dispositif d'essai de la résistance à la traction par flexion

Après avoir obtenu la valeur maximale de rupture (F_f) des éprouvettes, la résistance à la traction (R_f) est calculée par la formule suivante :

$$R_f \text{ (MPa)} = 2.34375 \times F_f \text{ (kN)}$$

a) Résistance à la traction à 2 jours d'âge

Les résultats des essais et le calcul des résistances R_f sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau n°18 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MR à 2 jours

Mortier de référence MR			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (kN)	R_f calculée (MPa)
E1	492,6	0,36	0,89
E2	487,3	0,42	1,03
E3	487,9	0,43	1,05
			1,0

Tableau n°19 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MN à 2 jours

Mortier au Néré MN			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (kN)	R_f calculée (MPa)
En1	472,3	0,15	0,35
En2	470,1	0,13	0,30
En3	474,0	0,17	0,44
			0,4

b) Résistance à la traction à 7 jours d'âge

Tableau n°20 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MR à 7 jours

Mortier de référence MR			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (KN)	R_f calculée (MPa)
E4	497,2	0,59	1,43
E5	506,2	0,55	1,33
E6	500,4	0,57	1,38
			1,4

Tableau n°20 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MN à 7 jours

Mortier au Néré MN			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (KN)	R_f calculée (MPa)
En4	533,6	0,32	0,80
En5	522,2	0,39	0,96
En6	525,6	0,35	0,87
			0,9

c) Résistance à la traction à 14 jours d'âge

Tableau n°21 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MR à 14 jours

Mortier de référence MR			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (KN)	R_f calculée (MPa)
E7	502,4	0,77	1,85
E8	500,9	0,83	1,99
E9	501,7	0,75	1,80
			1,9

Tableau n°22 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MN à 14 jours

Mortier au Néré MN			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (KN)	R_f calculée (MPa)
En7	529,8	0,63	1,52
En8	532,7	0,59	1,43
En9	528,7	0,67	1,62
			1,5

d) Résistance à la traction à 21 jours d'âge

Tableau n°23 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MR à 21 jours

Mortier de référence MR			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (KN)	R_f calculée (MPa)
E10	502,1	0,94	2,27
E11	502,7	1,04	2,48
E12	501,8	1,20	2,86
			2,5

Tableau n°24 : Détails des mesures de résistance R_f du mortier MN à 21 jours

Mortier au Néré MN			
Eprouvette	Masse (g)	F_f appliquée (KN)	R_f calculée (MPa)
En10	530,0	0,83	1,99
En11	529,4	0,93	2,22
En12	528,2	1,01	2,41
			2,2

2. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les six demi-échantillons prismatiques sont testés à la compression comme sur la photo.



Photo n°4 : Dispositif d'essai de la résistance à la compression

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

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

La résistance à la compression R_c est calculée à 0.05 MPa près et la moyenne des six résultats obtenus est enregistrée à 0.1 MPa près.

a) Résistance à la compression à 2 jours d'âge

Tableau n°25 : Détails des mesures de résistance R_c du mortier MR à 2 jours

Mortier de référence MR				
Echantillon	Masse (g)	F_c appliquée (KN)	R_c calculée	R_c retenue (MPa)
E1	492,6	2,04	1,32	ok
		1,56	1,02	Valeur écartée
E2	487,3	1,72	1,12	ok
		1,77	1,15	ok
E3	487,9	1,95	1,26	ok
		1,88	1,22	ok
			1,2 ± 10%	1,2

Tableau n°26 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MN à 2 jours

Mortier au Néré MN				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
En1	472,3	0,89	0,60	ok
		0,83	0,56	ok
En2	470,1	0,93	0,63	ok
		0,92	0,62	ok
En3	474,0	0,90	0,61	ok
		0,88	0,60	ok
			0,6 ± 10%	0,6

b) Résistance à la compression à 7 jours d'âge*Tableau n°27 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MR à 7 jours*

Mortier de référence MR				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
E4	497,2	2,86	1,83	ok
		2,61	1,68	ok
E5	506,2	2,90	1,86	ok
		2,88	1,80	ok
E6	500,4	3,03	1,94	ok
		2,83	1,81	ok
			1,8 ± 10%	1,8

Tableau n°28 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MN à 7 jours

Mortier au Néré MN				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
En4	533,6	2,16	1,40	ok
		1,91	1,24	ok
En5	522,2	1,90	1,23	ok
		1,88	1,22	ok
En6	525,6	2,33	1,50	Valeur écartée
		1,83	1,19	ok
			1,3 ± 10%	1,3

c) Résistance à la compression à 14 jours d'âge

Tableau n°29 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MR à 14 jours

Mortier de référence MR				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
E7	502,4	4,35	2,77	ok
		4,60	2,92	ok
E8	500,9	4,52	2,87	ok
		4,58	2,91	ok
E9	501,7	4,33	2,75	ok
		3,57	2,28	Valeur écartée
			2,8 ± 10%	2,8

Tableau n°30 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MN à 14 jours

Mortier au Néré MN				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
En7	529,8	3,57	2,28	Valeur écartée
		4,68	2,97	ok
En8	532,7	5,14	3,26	Valeur écartée
		4,66	2,96	ok
En9	528,7	4,53	2,88	ok
		4,75	3,01	ok
			2,9 ± 10%	3,0

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

Tableau n°31 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MR à 21 jours

Mortier de référence MR				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
E10	502,1	5,94	3,76	ok
		6,89	4,35	ok
E11	502,7	7,09	4,48	ok
		5,93	3,75	ok
E12	501,8	6,99	4,41	ok
		7,00	4,42	ok
			4,2 ± 10%	4,2

Tableau n°32 : Détails des mesures de résistance Rc du mortier MN à 21 jours

Mortier au Néré MN				
Eprouvette	Masse (g)	Fc appliquée (KN)	Rc calculée	Rc retenue (MPa)
En10	530,0	9,07	5,71	ok
		8,85	5,58	ok
En11	529,4	7,59	4,79	ok
		4,45	2,83	Valeur écartée
En12	528,2	7,65	4,83	ok
		9,30	5,86	ok
			4,9 ± 10%	5,3

B. RESISTANCE AUX AGRESSIONS CHIMIQUES

Les éprouvettes sont immergées dans les milieux agressifs après leur démoulage et cure de 24h dans l'eau. La résistance des différentes éprouvettes est obtenue par la mesure de leur perte en masse à l'âge considéré suivant l'expression :

$$\text{Perte en masse (\%)} = [(m_1 - m_2) / m_1] \times 100$$

1. RESISTANCE AU SULFATE DE SODIUM A 5%



Tableau n°33 : Détails de résistance à la solution de sulfate de sodium à 5%

Eprouvette	Masse m_1 (g)	Immersion (jours)	Masse m_2 (g)	Perte en masse
Mortier MR	494,5	2	494,5	0,00 %
		7	494,4	0,02 %
		14	494,4	0,02 %
		21	494,3	0,04 %
Mortier MN	497,3	2	497,3	0,00 %
		7	497,3	0,00 %
		14	497,25	0,01 %
		21	497,2	0,02 %

2. RESISTANCE AU CHLORURE DE MAGNESIUM A 5%



Tableau n°34 : Détails de résistance à la solution de chlorure de magnésium à 5%

Eprouvette	Masse m_1 (g)	Immersion (jours)	Masse m_2 (g)	Perte en masse
Mortier MR	506,3	2	506,3	0,00 %
		7	506,25	0,01 %
		14	506,25	0,01 %
		21	506,25	0,01 %
Mortier MN	496,5	2	496,5	0,00 %
		7	496,45	0,01 %
		14	496,4	0,02 %
		21	496,4	0,02 %