

5/04
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Rapport de Thèse
D'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Sujet :

*ÉTUDE DU RECYCLAGE DES DÉCHETS DE
MAÇONNERIE EN MORTIER*

Présenté par :

Mr. BOUZIDI Sid Ahmed

Promoteur

Mr K. SILHADI

Maitre de conférence (E.N.P.)

PROMOTION 2003 - 2004

Résumé

En Algérie, la maçonnerie est l'élément dominant dans la majorité des constructions, ainsi il représente la plus grosse partie des déchets de constructions.

Le but principal de cette étude est de montrer la possibilité de recycler les débris des éléments de maçonnerie « mortier de ciment, brique en terre cuite, plâtre ». C'est pour cela, dans un premier temps on va recycler le mortier de ciment, en le concassant puis l'introduire comme un sable à fin de confectionner un mortier à différents dosages « 350 kg/m³, et 250 kg/m³ ».

Dans un deuxième temps on va recycler, le matériau maçonnerie « 10 % de plâtre+79 % de brique+11% de mortier de ciment » concassé de la même manière que le sable précédent, ainsi qu'un autre sable contenant « 10% de plâtre+90% de sable naturel », avec un seul dosage de 350kg/m³.

Mots clés : Recyclage, Maçonnerie, Mortier de ciment, plâtre, brique.

Abstract

In Algeria, masonry is the key element in most of the constructions. It accounts for the main part of the wastes in construction.

The main objective of this work is to show the possibility of recycling the elements of the masonry « cement mortar, brick, plaster». For this purpose, and as a first step, the cement mortar is recycled by concassing it, than introducing it in the form of sand in order to confectionate a different composition mortar « 350 kg/m³, et 250 kg/m³ ».

In the second step, the « 10% plaster, 79% brick, 11% cement mortar » masonry material is recycled concassed in the same fashion as the former sand. The same operation is realized with a different sand the composition of which is « 10% plaser, 90% natural sand » with a 350 kg/m³ dosage.

Key words : Recycling, Masonry, cement mortar , plaster, brick

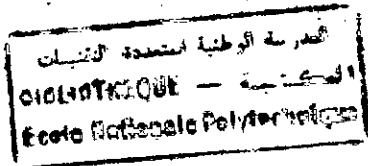
ملخص

الماسونية في الجزائر هو العنصر المسيطر في جل المنشآت, فهو اذا يمثل الجزء الأكبر من بقايا تحطيم البنيات.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة, هو تبين إمكانية إعادة استعمال بقايا عناصر الماسونية "ملاط الاسمنت, الأجر, الجبس" لهذا في المرحلة الأولى, سنقوم بإعادة استعمال ملاط الاسمنت بطحنه ثم إدخاله كرمل, لغرض تشكيل عجنة ملاط جديدة, بتركيز "350 كغ/م³, و 250 كغ/م³".

في المرحلة الثانية, سنقوم بإعادة استعمال الماسونية " 10% جبس+79% اجر+11% ملاط الاسمنت " مطحون, و هذا بنفس الطريقة المعمول بها بالنسبة للرمل السابق, و كذلك بالنسبة لرمل آخر يحتوي على " 10% جبس+90% رمل طبيعي " مع تركيز واحد 350 كغ/م³.

كلمات مفتاحيه : إعادة استعمال, الماسونية, ملاط الاسمنت, اجر, جبس.



REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu, le Tout Puissant, de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail, ainsi que mon cursus universitaire.

J'aimerais remercier de tout mon cœur mes parents qui m'ont soutenus et qui continueront à me soutenir dans tous les projets que j'entreprendrai. Ainsi que mes sœurs et mon frère Youcef, et toute ma famille. Sans oublier mes chers amis que j'ai rencontrés à l'école ainsi qu'à l'extérieur.

Je remercie très sincèrement mon promoteur Monsieur D^r K.SILHADI pour tous les savoirs qu'il m'a apportés en 3^{ème} année ainsi que mon cadrant pour mon projet de fin d'étude. Ainsi que tous les professeurs que j'ai eus pendant toute la période de mes études. Sans oublier Monsieur SAADA qui m'a aidé pendant l'opération du concassage et qui m'a ouvert les portes de son atelier, merci encore une fois.

Je voudrais remercier M^{lle} S. BEDJOU qui m'a soutenu et orienté pendant mon stage au sein du CNERIB.

Je tiens à remercier toutes les personnes du CNERIB pour les nombreuses explications qu'ils m'ont patiemment données, l'aide technique précieuse qu'ils m'ont apportée et le grand bénéfice que j'ai tiré au contact de leur expérience, en particulier : M^{er} BENNA, AIT-SAID, LAMINE, IDIR, SI-SABER, MALKI, Kamel, KROUBI, Abdelkader, sans oublier le très cher M^{er} M. BOUSRI.

المدرسة الوطنية المتعددة الفنون
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1

Chapitre I GÉNÉRALITÉS

1. HISTORIQUE	2
2. DÉFINITIONS	2
3. LE BATIMENT SE RECYCLE	3
4. RECHERCHES MENÉES SUR LE RECYCLAGE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION	3

Chapitre II GESTION DES DÉCHETS DE DÉMOLITION

1. INTRODUCTION	5
2. LES DÉCHETS DE LA CONSTRUCTION EN ALGERIE	5
3. PLATES FORMES DE GESTION DES DECHETS DE CHANTIERS	5
4. LA DECONSTRUCTION SELECTIVE	6
4.1 Définition	6
4.2 Objectif de la déconstruction sélective	6
4.3 Tri des déchets de chantier	6
4.4 L'outil informatique	6

Chapitre III LA MAÇONNERIE

1 GÉNÉRALITES	8
2 LES MORTIERS	8
2.1 Constitution des mortiers	8
2.1.1 Les liants	8
2.1.2 Les sables	9
2.2 Exigences applicables à l'ensemble des mortiers	9
2.3 Les enduits d'imperméabilisation	10
3 LA TERRE CUITE	11
3.1 Généralités	11
3.2 Propriétés mécaniques	12
3.3 Autres propriétés physiques	12
4. PLATRE	13
4.1. Définition	13
4.2 Liants hydrauliques et plâtre	14
4.3 Résistances mécaniques du plâtre	15
4.4 Propriétés physiques et chimiques du plâtre	15

Chapitre IV Matériels et matériaux utilisés

1. Matériels utilisés	16
2. Matériaux utilisés	17
2.1 Granulats	17
2.2 Ciment	19
2.2.1 Définition	19
2.2.2 Caractéristiques physico-mécaniques	20

2.2.3 Caractéristiques chimiques	20
2.2.4 Emplois courants	20
2.2.5 Contre-indication	20
2.2.6 Recommandations et conseils	21
2.3. Eau de gâchage	21
3. Confection du mortier	21

Chapitre V LES ESSAIS RÉALISÉS

1. INTRODUCTION	22
2. LES ESSAIS D'IDENTIFICATION DU MATERIAU	22
2.1 Analyse granulométrique	22
2.2 Module de finesse	22
2.3 Masses volumiques	23
2.4 Absorption d'eau	23
2.5 Compacité et porosité	23
2.6 Equivalent de sable	23
3 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES	23
3.1 Essais de maniabilité	24
3.2 Essai de résistance à la traction par flexion	24
3.3 Essai de résistance à la compression	24
3.4 Essai D'absorption capillaire	25
3.5 Mesure du retrait	26

Chapitre VI RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

1 INTRODUCTION	28
2 ESSAIS D'IDENTIFICATION	29
2.1 Sable recyclé à base de mortier de ciment	29
2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage	29
2.1.2 Module de finesse	30
2.1.3 Masses volumiques	30
2.1.4 Absorption d'eau	30
2.1.5 Compacité et porosité	31
2.1.6 Equivalent sable	31
2.2 Sable recyclé à base de brique+plâtre+mortier de ciment (S_{RB}), et sable à base de sable naturel+plâtre (S_{NP})	32
2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage	32
2.2.2 Module de finesse	33
2.2.3 Masses volumiques	33
2.2.4 Absorption d'eau	33
2.2.5 Compacité et porosité	34
2.2.6 Equivalent sable	34
3 CARACTÉRISATION DES MORTIERS	35
3.1 Sable recyclé à base de mortier de ciment	35
3.1.1 Etude de la maniabilité du mortier frais	35
3.1.2 La masse volumique apparente	36
3.1.2.1 Evolution de la masse volumique apparente dans le temps	37
3.1.2.2 Effet du rapport E/C sur la masse volumique apparente	38

3.1.3	Résistance à la compression	40
3.1.3.1	Accroissement de la résistance de la compression dans le temps	40
3.1.3.2	Etude de l'influence du rapport E/C sur la résistance a la compression	42
3.1.4	Résistance à la traction par flexion	43
3.1.4.1	Evolution de la résistance à la traction par flexion au cours du temps	44
3.1.4.2	Influence du rapport E/C sur la résistance à la traction par flexion	45
3.1.5	Rapport entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente	46
3.1.6	Etude du retrait	47
3.1.7	Capacité d'absorption d'eau	48
3.2	Sable recyclé à base de terre cuite, plâtre et mortier de ciment, et sable à base de sable naturel et plâtre recyclé	49
3.2.1	Etude de la maniabilité du mortier frais	49
3.2.2	La masse volumique apparente	49
3.2.2.1	Evolution de la masse volumique apparente dans le temps	50
3.2.2.2	Effet du rapport E/C sur la masse volumique apparente	51
3.2.3	Résistance à la compression	52
3.2.3.1	Accroissement de la résistance de la compression dans le temps	53
3.2.3.2	Etude de l'influence du rapport E/C sur la résistance a la compression	54
3.2.4	Résistance à la traction par flexion	55
3.2.4.1	Evolution de la résistance à la traction par flexion au cours du temps	56
3.2.4.2	Influence du rapport E/C sur la résistance à la traction par flexion	57
3.2.5	Etude du retrait	58
3.2.6	Capacité d'absorption d'eau	59
	CONCLUSION	60
	BIBLIOGRAPHIE	
	ANNEXE	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'avenir de notre planète est devenu un sujet préoccupant depuis maintenant bon nombre d'années. Cet avenir passe inévitablement par la limitation des pollutions quelles qu'elles soient. Ces pollutions sont dues à l'activité grandissante de l'homme. Un exemple en est le secteur du Bâtiment qui produit 65% de déchets inertes (pierres, béton, briques, céramiques...), 30% de déchets industriels banals (emballages et matériaux papier, plastiques, textile, bois non traité...) et environ 5% de déchets spéciaux (peintures, solvants, bois traités...) [1].

On constate par ailleurs que le mode d'élimination des déchets le plus répandu sur la planète, y compris dans les pays développés, reste la très contestée mise en décharge. De ce fait les projets d'installation de stockage ou d'élimination des déchets sont massivement rejetés par les populations avoisinantes. Mais parallèlement, et avec une certaine logique, les revendications comportent également une solution: il faut **recycler**. Le recyclage, qui est pourtant une activité industrielle ancienne, est donc souvent présenté comme une voie nouvelle de la gestion des déchets et peu explorée, dont l'objectif premier serait de concourir à la protection de l'environnement.[2]

Les déchets inertes sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et de certains secteurs industriels. La réutilisation et le recyclage de ces déchets doivent être encouragés dès lors qu'ils sont possibles. Cependant, suivant les conditions techniques et économiques, certains déchets ne peuvent être réutilisés ou recyclés ; ils doivent ainsi être éliminés dans des installations de stockage [3].

L'importance écologique et économique du secteur recyclage ne peut être contestée. D'une part, il débarrasse le détenteur du déchet d'un produit dont il aurait dû financer l'élimination, d'autre part, il assure un service d'intérêt collectif vis-à-vis de la protection de l'environnement. Néanmoins les filières du recyclage risquent aussi de se trouver mises en cause sérieusement et durablement si la qualité et surtout la sécurité des produits recyclés ne peuvent être garanties.

Les matériaux de recyclage offrent aujourd'hui une véritable alternative technique et économique dans bon nombre d'applications, car ils doivent répondre aux mêmes règles d'assurance qualité que les matériaux naturels, quant à leurs performances mécaniques, physiques, leurs modalités de fourniture et leurs modes d'utilisation [1]. C'est dans ce cadre que nous avons contribué à l'élaboration de "nouveaux matériaux" à partir de déchets de construction issus de débris de maçonneries : débris de mortier de ciment, de plâtre et de briques. Notre étude comporte deux axes complémentaires :

- ✓ Le 1^{er} axe : l'étude des propriétés physico-chimiques de ces nouveaux matériaux de recyclage, avec les essais d'identification
- ✓ Le 2^{ème} axe : complémentaire au précédent, qui est l'étude du comportement et des conséquences rhéologiques et mécaniques en termes de durabilité de l'usage de tels matériaux.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS

1. HISTORIQUE

Le principe du recyclage de matériaux était déjà employé par les romains. En effet, ils détruisaient les statues des dieux qui n'étaient plus vénérés et les matériaux récupérés servaient à en faire de nouvelles [4]. Pendant et après la seconde guerre mondiale, les gravats provenant des bâtiments détruits par les bombardements étaient employés en Grande Bretagne et en Allemagne, pour la reconstruction de bâtiments [4]. Les publications de cette époque soulignent notamment l'intérêt du réemploi des matériaux de démolition et citent les premiers résultats sur les granulats provenant du concassage de béton.

Cette période d'après-guerre est suivie d'une pose assez longue dans les études, jusqu'à la publication par Buck, d'un rapport de recherche en 1973 ; puis la présentation par le même auteur, d'une communication en 1976 sur l'étude des propriétés physiques des granulats de « béton recyclé » et la comparaison des résistances mécaniques des bétons neufs et recyclés. Les résultats obtenus sont confirmés par Malhotra et complétés par des observations aux microscopes optiques et électroniques à balayage sur les matrices de ciment hydraté. Fondistou-Yannas et Tomasawa mesurent les modules d'élasticité et de retrait d'hydratation du béton recyclé. A partir de 1975, on procède aux Etats-Unis aux premières tentatives de béton armé. La faisabilité de ces opérations est confirmée en 1977 dans deux publications de Frondistou-Yannas tandis que Wilson évalue les « ressources potentielles de débris de démolition aux Etats-Unis » Et les seuils de rentabilité des opérations de recyclage » [5].

2. DÉFINITIONS

Récupérer un déchet, c'est le sortir de son circuit traditionnel de collecte et de traitement. La récupération, qui suppose une collecte séparée ou un tri, se situe en amont de la valorisation.

Le **recyclage** est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve.

Le **réemploi** est un nouvel emploi d'un déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation. C'est, en quelque sorte, prolonger la durée de vie du produit avant qu'il ne devienne un déchet.

La **réutilisation** consiste à utiliser un déchet pour un usage différent de son premier emploi, ou à faire, à partir d'un déchet, un autre produit que celui qui lui a donné naissance.

La **régénération** consiste en un procédé physique ou chimique qui redonne à un déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en remplacement d'une matière première neuve.

La **valorisation** consiste dans « le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie » (loi du 13 juillet 1992). Elle a pour objet de redonner une valeur marchande aux déchets [2].

3. LE BATIMENT SE RECYCLE [15]

En Europe 30% seulement des matériaux utilisés dans la construction du bâtiment sont actuellement recyclés, alors que la pratique, dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables. En outre, l'industrie de la construction ne pose pas seulement des problèmes à la fin du cycle de vie de ses produits, mais également à son début. Enorme consommatrice de matières premières, elle absorbe chaque année l'équivalent de six à huit tonnes de matériaux par habitant. "Le recyclage nécessite une double approche, à savoir une utilisation accrue de matériaux de construction incorporant des composants recyclés et une récupération beaucoup plus systématique des rebuts issus des démolitions d'immeuble", estime Carlo De Pauw, coordinateur général du réseau européen de recherche sur les technologies de la construction.

Ce dernier défi est de loin le plus difficile à relever en raison de la longévité des constructions. Nombreuses sont celles qui sont démolies aujourd'hui et qui ont été édifiées dans la première moitié du siècle, sans aucune considération pour cette question. Or, recycler est une entreprise qui se prépare idéalement très en amont, par le choix des matériaux ainsi que la manière de les assembler. La réflexion menée aujourd'hui sur la façon de concevoir un bâtiment durable, à savoir son potentiel de recyclage, bénéficiera donc aux générations futures.

Les solutions sont variées. Les murs, par exemple, sont construits avec des blocs de béton dans lesquels les graviers ont été remplacés par des déchets d'aciérie. La finesse des briques de parement est obtenue avec des granulats d'écrans d'ordinateurs et de télévisions broyés. Les châssis des fenêtres sont en PVC recyclés. "Il s'agit d'une maison de démonstration", explique Edmond Rousseau (CSTC). "Nous proposons une gamme d'utilisation de quelque 210 matériaux recyclés déjà disponibles sur le marché. Ceux-ci viennent des quatre coins d'Europe. Mais dans tous les cas, ces matériaux doivent évidemment répondre à une série d'exigences techniques pour soutenir la comparaison avec des matériaux traditionnels.

4. RECHERCHES MENÉES SUR LE RECYCLAGE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

En vue de la valorisation des matériaux issus de la démolition des immeubles en les recyclant, plusieurs travaux de recherche ont été élaborés dans ce contexte. En Algérie, et en collaboration avec le ministère de l'enseignement supérieur est de la recherche scientifique, ainsi que quelques organismes nationaux tel que le centre national d'Etudes et de Recherches Intégrées en Bâtiment, et dans le cadre d'un Programme National de Recherche qui porte sur la «Valorisation des déchets de construction » certains chercheurs ont répondu à cette requête, comme Bedjou [16] qui a travaillé sur le recyclage des débris de terre cuite, ou encore Debieb [17] sur la valorisation des déchets de briques et béton de démolition comme agrégats de béton.

En Belgique le centre scientifique et technique de la construction (CSTC), est à l'origine d'un projet exemplaire de la valorisation des déchets en matériaux recyclés pour la construction, qui s'intitule Le projet RECYHOUSE. Cette construction exemplaire d'un bâtiment-témoin qui a nécessité cinq années de travail sur le site de la station expérimentale à Limelette, intègre un peu plus de 150 matériaux venant de toute l'Europe fabriqués de débris de construction et/ou de la valorisation des déchets ou sous-produits issus d'autres secteurs industriels. L'objectif du projet est de démontrer qu'il est possible d'édifier un bâtiment presque uniquement au moyen de matériaux recyclés répondant aux exigences d'une construction moderne, sans nécessairement nuire aux performances finales, ni augmenter le coût de la construction [6].

Une importante étude sur le recyclage de déchet de plâtre, dont des déchets de démolition à été réaliser en Allemagne. Cette étude est destinée à déterminer la faisabilité technique d'un nouveau procédé de recyclage de déchets de démolition. Les déchets sont incorporés sous formes de granulats dans des pâtes de plâtre. Des essais de temps de prise, maniabilité, masse volumique, résistances en flexion et en compression, dureté, aspects de parement et ségrégation ont été réalisée. L'expérimentation préliminaire réalisée avec des granulats fabriqués en laboratoire a permis d'étudier l'influence de la granulométrie et de la porosité des granulats. L'étude a été poursuivie sur des déchets prélevés sur des chantiers de démolition. Ces déchets ont au préalable été caractérisés. Après concassage et tri éventuel, ils ont été incorporés jusqu'à hauteur de 50% de la masse de plâtre. Les résultats apparaissent relativement dispersés. Les tendances suivantes ont cependant été observées. L'incorporation des déchets entraîne des améliorations de certaines performances: diminution du temps de prise et augmentation de la dureté. Les résistances en compression varient peu. En revanche les résistances en flexion peuvent diminuer de 40%. Ce résultat n'apparaît pas cependant inadmissible. En effet, malgré des résistances plus faibles, les carreaux contenant des déchets devraient pouvoir encore satisfaire aux exigences normatives. Il faut également noter une diminution de la maniabilité et une faible augmentation de la masse volumique. L'incorporation d'impuretés constituées essentiellement de terre cuite, mortier, carrelage n'affecte pas de manière très sensible les propriétés des plâtres contenant des déchets [7].

L'entreprise Raisch products, de San Jose en Californie, a proposé une nouvelle approche du recyclage des débris de construction et de démolition avec la mise sur pied d'un parc écologique abritant une diversité de recycleurs de déchets de construction et de démolition servant de poste de transformation et de réutilisation des matériaux de construction qui proviennent des municipalités, comtés et des propriétaires [8].

**CHAPITRE II : GESTION DES
DÉCHETS DE
DÉMOLITION**

1. INTRODUCTION

Les déchets inertes sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et de certains secteurs industriels. La réutilisation et le recyclage de ces déchets doivent être encouragés. Cependant, suivant les conditions techniques et économiques (absence de marché, faible valeur des granulats naturels rendant prohibitif l'utilisation de matériaux recyclés...), certains déchets ne peuvent être réutilisés ou recyclés ; ils doivent ainsi être éliminés dans des installations de stockage.

Les déchets qui sont actuellement stockés dans des décharges couramment appelés « de classe 3 » sont en réalité composés de déchets « vraiment inertes » tels que les terres de terrassement non polluées, les pierres, le béton... et de déchets « plus ou moins inertes » tels que le plâtre et certains déchets d'origine industrielle. De plus les déchets inertes sont couramment associés à de faibles quantités de bois, de plastiques, de moquettes... La qualité des déchets issus des chantiers dépend en particulier des techniques employées pour démolir et trier sur ou hors chantier [3]. Dans le cas idéal il faudrait arriver à « déconstruire » pour assurer un taux de récupération maximal.

2. LES DECHETS DE LA CONSTRUCTION EN ALGERIE

Comme partout dans le monde l'industrie du BTP (Bâtiment, Travaux Publics) est une grosse consommatrice de matières premières et productrice de déchets. Elle utilise et génère aussi bien des matériaux minéraux dit inertes (béton, plâtre, terre cuite, laine minérale, verre, etc.).

En Algérie, la problématique des déchets de construction est proportionnelle au développement des secteurs du BTP, en vu de la demande très importante en matière de logements, d'infrastructures et d'équipements hydrauliques, l'Algérie connaîtra dans les années à venir une croissance très importante en matière de déchets de chantier dont la problématique se pose d'ores et déjà notamment dans les grands centres urbains. D'autre part, des statistiques ont été évaluées par le gouvernement concernant les déchets solides urbains et ont été transmises aux Nations Unies [9].

3. PLATES FORMES DE GESTION DES DECHETS DE CHANTIERS

En Europe, des plates-formes de gestion des déchets de chantiers sont progressivement mises en place sur le territoire régional, à l'initiative de professionnels du BTP ou des déchets, souvent associées à des centres de stockage des déchets inertes ultimes [10]. Les centres de stockage se subdivisent en trois classes :

- ✓ Le centre de stockage de Classe 1 est réservé aux déchets dangereux (solvants, peintures...);
- ✓ Le centre de stockage de Classe 2 accueille des Déchets Industriels Banals (matières plastiques, métaux, déchets d'emballage...);

- ✓ Le centre de stockage de Classe 3 reçoit uniquement des déchets inertes (gravats, béton, briques, tuile) (en 1998) [11] ;

4. LA DECONSTRUCTION SELECTIVE

4.1 Définition

La déconstruction sélective consiste à séparer et trier les matériaux lors des travaux de démolition afin d'améliorer leur qualité et de favoriser leur valorisation. La déconstruction sélective constitue une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles [12]. Elle consiste en une démolition réalisée matériau par matériau, afin de diminuer au maximum le mélange des déchets générés par les travaux. Il s'agit d'un « déshabillage » progressif du bâtiment pour ne laisser en dernier lieu que la structure.

4.2 Objectif de la déconstruction sélective

Le principal objectif de la déconstruction sélective, c'est d'arriver à un tri sélectif pour maîtriser le coût. Or, on peut remarquer qu'avec une démolition conventionnelle on aura des matériaux qui sont mélangés et contiennent généralement des substances dont la séparation s'avère difficile, voire impossible. Par exemple un mur de maçonnerie extérieur qui se compose de trois matériaux (plâtre+mortier de ciment+brique) dont la séparation est très difficile et coûteuse.

4.3 Tri des déchets de chantier

Sur les chantiers de démolition la majorité des déchets rencontrés (métaux, bois, gravats amiante...) ne suivent pas les mêmes filières de valorisation ou d'élimination. La mise en place du tri des déchets est une procédure simple qui permet d'être en conformité avec la réglementation et de réduire les coûts liés à leur élimination [13].

Le tri, permet d'augmenter la pureté de la fraction valorisable des déchets. Plusieurs critères doivent être pris en compte comme le volume des déchets, la place disponible sur le chantier et la difficulté du tri lui-même car certains matériaux sont difficiles à caractériser sur le chantier. Dans les pays développés notamment les pays européens et les Etats-Unis, les déchets de chantier sont de plus en plus triés à la source et une quantité passera dans des centres de tri. Le centre de tri constitue une structure essentielle pour assurer la qualité des matières récupérables [14].

4.4 L'outil informatique

L'IFARE/DFIU a développé un prototype de logiciel de planification de chantier de démolition. Associé à des banques de données sur les filières de recyclage, les matériaux de construction et les techniques de recyclage, il permet une saisie rapide des caractéristiques du bâtiment et le calcul des données nécessaires pour la planification de la déconstruction et de la gestion de déchets [18] (figure 2.1).

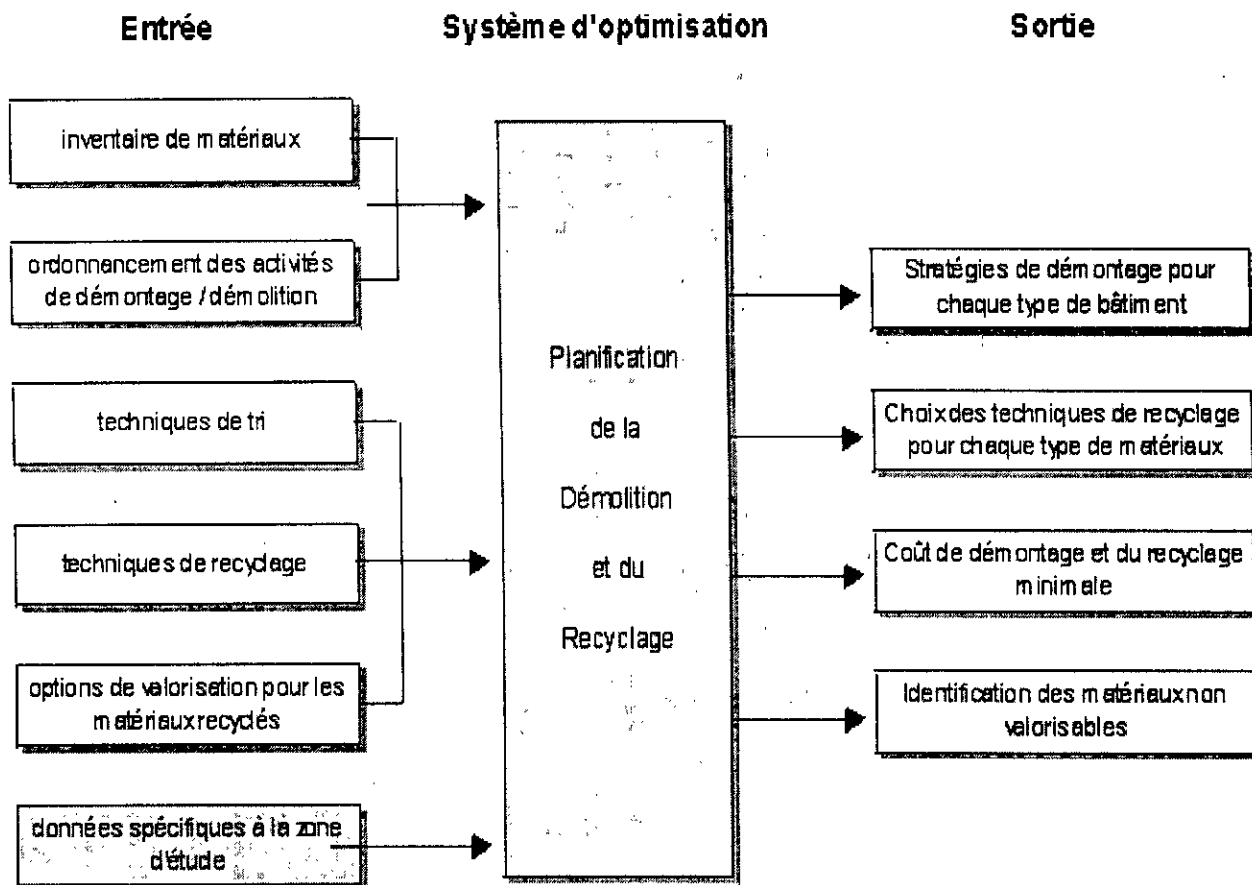


Figure 2.1 Structure du modèle informatisé d'optimisation du démontage et du recyclage des bâtiments résidentiels [19]

**CHAPITRE III : LA
MAÇONNERIE**

1 GÉNÉRALITES

La maçonnerie est considérée comme la technique de construction la plus répandue : en effet, comme elle n'utilise pour l'essentiel que des petits éléments hourdés au mortier, elle ne nécessite pas sur le chantier de moyens de manutention importants elle est donc à la portée de toutes les entreprises et en particulier de l'artisanat maçon qui réalise d'ailleurs la plupart des petites constructions en secteur diffus.

La maçonnerie, associée au béton armé pour la réalisation de la structure, est de ce fait la technique la plus utilisée en Algérie pour la construction de murs dans les bâtiments à usage d'habitation, ainsi que de plus en plus pour les bâtiments tertiaires et les bâtiments à usage industriel, commercial ou agricole.

Rappelons en effet qu'un mur, surtout s'il s'agit d'un mur extérieur, doit en fonction du rôle qu'il assume dans la construction satisfaire à des exigences nombreuses et variées :

- ✓ résistance mécanique aux diverses sollicitations qu'il subit dans son plan, surtout verticalement mais aussi horizontalement (contreventement de la construction) et perpendiculairement à son plan (action du vent, poussée des terres, chocs) ;
- ✓ résistance à la pénétration de la pluie et du vent ;
- ✓ contribution à l'isolation thermique et acoustique des locaux qu'il délimite [20].

Il est vrai que la grande diversité des éléments de maçonnerie (nature des matériaux, dimensions et structure interne des éléments) s'ajoute à une variété limitée des mortiers associés nous mène à penser qu'un recyclage des matériaux de maçonnerie est possible, vu le caractère inerte des matériaux le constituant.

2 LES MORTIERS

2.1 Constitution des mortiers

Les mortiers sont principalement constitués de charges, de liants et d'eau. Comme pour les bétons, des ajouts viennent en modifier les propriétés, essentiellement dans le domaine des mortiers industriels.

2.1.1 Les liants

a- le ciment

Le ciment utilisé est, dans la plupart des cas, du ciment Portland avec ou sans constituant secondaire (CPA-CEM I et CPJ-CEM II/A ou B).

Pour les mortiers réalisés sur chantier, on préfère les ciments à faible résistance mécanique

(classe 32,5) qui donnent des mortiers moins "nerveux", au retrait moins important et présentant une déformabilité mieux adaptée.

b- La chaux

On désigne, sous l'appellation de chaux, plusieurs liants aux propriétés très différentes, qui sont :

- ◇ Les chaux aériennes
- ◇ Les chaux hydrauliques naturelles
- ◇ Les chaux hydrauliques artificielles

En Algérie leur usage est devenu plutôt rare.

2.1.2 Les sables

Généralement les sables utilisés pour la confection des mortiers ont une granulométrie de 0/3 mm. Ils proviennent de deux sources :

- ✓ Naturelle : Mer, Oued, Sahara. Ce cas représente la quasi totalité des constructions.
- ✓ Industrielle : issu du concassage des granulats de carrière, et plus rarement du recyclage des déchets de construction.

2.2 Exigences applicables à l'ensemble des mortiers [20]

Pour les mortiers traditionnels réalisés sur chantier, les performances requises sont réputées satisfaites moyennant le respect des dosages en liants donnés dans le DTR Maçonnerie ou dans le DTU 20.1 ; quant aux mortiers industriels, ils font l'objet de spécifications de fabrication précises. Les principales caractéristiques visées sont les suivantes :

- sur la poudre : masse volumique, granulométrie ;
- sur la pâte : rétention d'eau, durée pratique d'utilisation, temps ouvert, temps d'ajustabilité, temps de prise ;
- sur le produit durci : résistance en compression, résistance en traction par flexion, module d'élasticité, variations dimensionnelles et pondérales.

Voici les principales caractéristiques performanciennes déterminant l'aptitude à l'emploi de ces produits.

• Maniabilité

Suivant les emplois, les propriétés requises peuvent être différentes mais dans tous les cas, la maniabilité du mortier conditionne sa mise en oeuvre.

La maniabilité est apportée par les éléments fins (liants et fillers) et par les adjuvants.

Cela explique le surdosage fréquent des mortiers traditionnels composés uniquement de sable et de ciment.

- **Conditions d'hydratation**

Un autre problème, généralement rencontré lors de la mise en oeuvre des mortiers, est celui de l'hydratation correcte du liant. Les liants hydrauliques ont besoin d'eau pour durcir normalement. Or les mortiers sont souvent appliqués en couche mince et risquent une déshydratation prématurée due à l'absorption des matériaux avec lesquels ils sont en contact ou à l'évaporation. Ce risque amène à utiliser des produits spécifiques (formulations contenant des rétenteurs d'eau) et à prendre des précautions particulières lors de leur emploi par temps chaud (humidification des supports et réhumidification ultérieure).

- **Déformabilité**

Aussi bien dans les travaux de liaisonnement que de revêtement, le mortier est utilisé en association avec d'autres matériaux et doit présenter une déformabilité suffisante pour absorber les variations dimensionnelles admissibles des supports.

Dans les maçonneries, c'est le mortier de montage qui, par son adaptation, permet une bonne répartition des contraintes dans les éléments.

- **retrait**

Les contraintes qui résultent du retrait peuvent être absorbées par le développement de microfissures internes non préjudiciables au comportement ultérieur du mortier. Toutefois, dans les travaux de surface, elles peuvent également conduire à des fissurations d'autant plus préjudiciables que le mortier est destiné à assurer la protection de la maçonnerie vis-à-vis de la pluie. Il y a lieu de noter que ces contraintes dépendent non seulement du retrait mais également des caractéristiques mécaniques du mortier et en particulier de son module d'élasticité.

- **Adhérence**

L'adhérence du mortier aux matériaux associés est, dans un grand nombre de cas, un critère primordial de bon comportement.

- **Durabilité**

Dans tous les emplois extérieurs, la résistance aux intempéries conditionne la durabilité du mortier (capillarité, perméabilité à l'eau et à la vapeur, résistance au gel).

En outre, pour les travaux de surface, le mortier doit présenter une résistance aux chocs et à l'abrasion adaptée au niveau de sollicitation prévu (sol, mur, exposition, ...).

Des indications plus précises sont données ci-après sur les mortiers de montage (y compris mortiers-colles et mortiers légers) et sur les enduits d'imperméabilisation []

2.3 Les enduits d'imperméabilisation

Appliqués sur murs en maçonnerie (blocs de béton, briques, blocs de béton cellulaire ou pierre), ils ont pour fonction :

- d'assurer l'étanchéité globale du mur en limitant de façon importante la quantité d'eau susceptible d'atteindre le support : c'est la fonction imperméabilisation ;

- de rectifier les défauts de planéité du mur et d'apporter, par leur relief et leur couleur, la finition d'aspect désirée.

Ils doivent pour cela présenter les propriétés suivantes :

- adhérence et compatibilité avec le support,
- imperméabilité (faible capillarité),
- résistance à la fissuration,
- résistance aux chocs et aux dégradations.

Un mortier traditionnel ne peut posséder, à-la fois, l'ensemble de ces propriétés. C'est la raison pour laquelle il est réalisé en plusieurs couches, chacune d'elles ayant une fonction et une composition distinctes.

✓ **Couche d'accrochage (ou gobetis)**

Cette première couche, fortement dosée en ciment et laissée brute de projection, a pour but d'assurer l'adhérence de l'enduit au support.

✓ **Corps d'enduit**

Cette seconde couche, moins dosée en liant pour limiter le retrait mais suffisamment pour présenter une faible capillarité, assure l'essentiel de l'imperméabilisation ainsi que la planéité d'ensemble ; elle doit être serrée lors de l'application pour améliorer sa compacité.

✓ **Couche de finition**

Cette troisième couche, plus faiblement dosée pour éviter faïençage et fissuration, assure la finition d'aspect ; elle peut être remplacée par un enduit décoratif ou un RPE (revêtement plastique épais).

3 LA TERRE CUITE [20]

3.1 Généralités

✓ **Définition**

La terre cuite est un matériau provenant de la cuisson d'une pâte argileuse. On englobe sous le nom d'argile un grand nombre de minéraux silico-alumineux présentant la particularité de donner, en mélange avec de l'eau, des pâtes plastiques aptes au façonnage, et de donner après cuisson des matériaux d'une grande cohésion.

✓ Domaine d'emploi

Les produits de terre cuite sont utilisés dans la construction de bâtiments depuis des siècles. Leur domaine d'emploi s'étend aujourd'hui à la réalisation de nombreux ouvrages de bâtiment (murs, cloisons, planchers, couvertures, revêtements de sols et de murs, conduits de fumée, éléments de décoration etc...). Parmi les différents produits on trouve, les briques « pleines ou perforées » et tuiles, etc.

3.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques de la terre cuite varient avec sa composition initiale, et avec la température et la durée de cuisson qui fixent les microstructures finales et déterminent la répartition des différentes phases en présence.

Les terres cuites sont des matériaux hétérogènes et poreux, constitués de phases solides distinctes. Ces pores, qui constituent des discontinuités dans le matériau, sont la principale cause de leur fragilité. De plus, dans cas des argiles calcaires, le départ du dioxyde de carbone dû à décomposition du carbonate de calcium accroît lors de la cuisson porosité du produit.

La loi de comportement de la terre cuite est de type élastique linéaire à rupture fragile. La résistance en compression peut varier entre 5 et 40 MPa dans le cas des briques pleines et entre 3 et 100 MPa dans le cas de produits creux. Les résistances en traction peuvent varier entre 5 et 12 MPa. Le module d'élasticité E croît avec la résistance à la compression; il est plus élevé pour les schistes argileux que pour les argiles de surface. Il varie de 9 000 à 15 000 MPa dans le cas des briques pleines courantes et de 20 000 à 40 000 MPa environ dans le cas des produits creux. Ce module augmente avec la température de cuisson, plus fortement après 1 050°C. Il peut être relié à la porosité (P) par la relation empirique suivante :

$$E = E_0 (1 - 1,9P + 0,9P^2)$$

Où E_0 représente le module d'un matériau à porosité nulle.

Les seuls produits pour lesquels des performances mécaniques sont demandées dans les normes de référence sont les produits de maçonnerie (résistance en compression) et les entrevous pour planchers préfabriqués (rupture par poinçonnement-flexion, résistance en compression, module d'élasticité).

3.3 Autres propriétés physiques

Les terres cuites peuvent être le siège de variations dimensionnelles avec l'humidité. En effet, les produits, totalement secs à la sortie du four, absorbent de l'eau par hygroscopicité et de ce fait gonflent de quelques dixièmes de millimètres par mètre. Ce gonflement intervenant avant la mise en oeuvre des produits, n'entraîne généralement pas de désordres particuliers sur les ouvrages.

En revanche, pour certains types de terre cuite, un autre mode de gonflement beaucoup plus important peut intervenir. Ce dernier est irréversible à la température ordinaire et seule une recuisson permet un retour à l'état initial. On peut provoquer

artificiellement ce gonflement à l'autoclave (180°C, 10 MPa) et l'on admet entre le gonflement naturel à long terme g_n et le gonflement à l'autoclave g_a , exprimés en millimètres par mètre, la relation suivante :

$$g_n = 0,60 g_a + 0,605$$

Une autre propriété physique importante de la terre cuite, liée à sa porosité, est sa résistance au gel. Bien que cette dernière ne soit pas seulement fonction du volume des vides mais aussi du diamètre des pores, on peut considérer qu'une résistance élevée en compression va généralement de pair avec une bonne résistance au gel. Les altérations sont dues à des éclatements produits par l'augmentation du volume de l'eau contenue dans les pores. La résistance au gel d'un produit est caractérisée dans les normes par une mesure de perte de masse sous l'effet de cycles répétés de gel et de dégel.

4. PLÂTRE [21]

4.1. Définition

Le plâtre est le produit obtenu par déshydratation et pulvérisation plus ou moins poussées du gypse constitué par du sulfate de calcium bihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Selon la température de cuisson et le procédé de fabrication, on distingue plusieurs groupes de plâtres:

✓ Plâtre stuc

Le plâtre stuc est cuit à basses températures et est, par conséquent, seulement partiellement déshydraté.

Il est principalement utilisé pour la confection d'éléments préfabriqués en plâtre.

✓ Plâtre pour enduits

Le plâtre pour enduits est cuit à des températures plus élevées que le plâtre stuc. En général il fait prise plus rapidement, mais se laisse travailler plus longtemps en surface.

Il est principalement utilisé pour la confection d'enduits de murs et de plafonds en plâtre pur.

En fonction de la granularité il existe deux plâtres pour enduits:

- Le plâtre gros pour enduits.
- Le plâtre fin pour enduits.

✓ Plâtre retardé

Le plâtre retardé est un plâtre à prise lente, constitué principalement de sulfate de calcium semi-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

Des additions destinées à assurer sa stabilité, à régulariser sa prise et à améliorer son ouvrabilité sont permises en fabrication.

Il est principalement utilisé pour la confection d'enduits de murs et de plafonds en mortier de plâtre.

4.2 Liants hydrauliques et plâtre [22]

Les chaux hydrauliques et les ciments sont appelés liants hydrauliques car, mélangés avec de l'eau, ils forment une pâte qui se solidifie peu à peu, non seulement dans l'air mais également sous l'eau où elle conserve sa rigidité. Le caractère hydraulique des liants apparaît à la cuisson d'un mélange de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et de calcaire (CaCO_3).

Les chaux aériennes (CaO), sont ainsi dénommées car elles ne peuvent durcir pour reformer le calcaire dont elles sont issues qu'au contact du gaz carbonique de l'air. Ce ne sont pas des liants hydrauliques. Elles contiennent trop peu de silicates et d'aluminates combinés (moins de 10%). Les plâtres ($\text{CaSO}_4, \text{H}_2\text{O}$) ne sont pas non plus des liants hydrauliques.

Le problème de compatibilité chimique est posé par le contact plâtre-liant hydraulique. Ce problème est double :

il y a formation de deux sels gonflants : - étringite
- thaumasite

En présence d'eau, le sulfate de calcium (SO_4) du gypse réagit avec l'alumine insolubilisée par la chaux des liants hydrauliques pour fixer de très nombreuses molécules d'eau et créer un sel pulvérulent. Ce sel, mis en évidence par Candlot, est appelé étringite.

En présence d'eau, et d'étringite le sulfate de calcium du gypse réagit avec les silicates et la chaux des liants hydrauliques pour fixer de très nombreuses molécules d'eau et créer un deuxième sel appelé thaumasite.

L'apparition de ces sels est capricieuse. Il faut une forte hygrométrie et leur formation est lente : quelques semaines ou parfois jamais... les conditions de formation de la thaumasite ne sont pas entièrement claires : la température de $+4^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, et une teneur initiale en alumine réactive de l'ordre de 0,4% à 1% sont favorables. Leur caractère capricieux est malheureusement le moindre de leurs défauts.

Ces sels, véritables "bacilles du ciment", sont extraordinairement expansifs. Ils sont à l'origine de très nombreux sinistres dans le bâtiment et le génie civil. Partout où de l'eau sulfatée ou gypseuse, dites séléniteuse, baigne des mortiers ou bétons de liants hydrauliques (piles de ponts, ouvrage à la mer, tunnels, égouts, fondations), ils sont susceptibles d'apparaître et de créer des désordres. On dirait alors qu'on a fait exploser à l'intérieur de la masse une petite charge de poudre suffisante pour la briser, mais insuffisante pour la disloquer complètement. On évite ces phénomènes expansifs, en utilisant des ciments spéciaux pauvres en aluminates ou en chaux libre (ciments sursulfatés et ciments alumineux ou fondus).

Ces gonflements peuvent se produire dans des enduits de ciment bien exposés aux pluies, au droit de scellements réalisés en plâtre. Dans le sud Algérien, on peut en remarquer, à proximité de lieux particulièrement humides, sur des soubassements en plâtre revêtus d'un enduit au ciment.

Leifeld (1970) en a même découvert moins de huit semaines après la réalisation d'enduit extérieur et intérieur en mortier de plâtre-chaux aérienne. Les aluminates provenaient d'une pollution argileuse du sable utilisé.

4.3 Résistances mécaniques du plâtre [23]

La quantité d'eau de gâchage du plâtre n'agit pas seulement sur la rapidité de prise et de durcissement ainsi que sur la compacité du produit, mais comme pour les pâtes de ciment, son action est très sensible sur les résistances mécaniques.

Le plâtre ayant fait prise a une résistance mécanique très variable avec le pourcentage d'eau qui l'imbibé ; ceci est dû au fait que la solubilité des cristaux dans l'eau d'imbibition est appréciable. Ce fait nuit à la stabilité de l'enchevêtrement des aiguilles, qui forment dès lors un ensemble moins rigide.

La résistance du plâtre dépend par ailleurs de sa nature, de sa composition et de sa finesse. Le durcissement et l'accroissement de résistance du plâtre ayant fait prise et conservé à l'air ambiant non saturé d'humidité est dû presque uniquement à l'évaporation progressive de l'excédent d'eau de gâchage non nécessaire à l'hydratation. Si le plâtre est conservé en atmosphère saturée aussitôt après sa prise, sa résistance mécanique ne varie pratiquement plus.

4.4 Propriétés physiques et chimiques du plâtre [23]

Le plâtre est cinq fois plus soluble dans l'eau salée à 60 g par litre que dans l'eau douce (maximum de solubilité : dans les eaux saumâtres, 2 fois plus salées que l'eau de mer).

Les eaux contenant en solution du chlorure de magnésium jouissent de la même propriété que les eaux contenant du chlorure de sodium.

Ce point est à noter, surtout en ce qui concerne l'emploi des ciments Portland dans certaines régions, telles que l'Afrique du Nord ; ces eaux saumâtres, en communication avec des terrains gypseux, sont particulièrement dangereuses pour les ciments mettant en liberté de la chaux non fixée et contenant des aluminates (formation de sel de Candlot expansif).

Le plâtre, contrairement aux ciments basiques, corrode le fer et l'acier, et ceci, d'autant plus facilement que le plâtre contient de l'eau dans ses pores. Aussi ne peut-on se servir, pour le gâchage et le moulage du plâtre, d'outils et de moules en fer, mais en laiton de préférence.

On ne peut pas armer le plâtre comme le ciment, mais on le fait parfois en utilisant des *armatures galvanisées*.

L'intérêt du plâtre, c'est qu'il permet d'économiser le ciment, qui exige beaucoup plus de charbon pour sa fabrication ; il est non seulement plus avantageux à ce titre, mais les cloisons de plâtre, ainsi que les enduits, sont un excellent isolant thermique très ignifuge et insonore.

En raison de sa solubilité, le plâtre ne peut être utilisé pour les extérieurs, ainsi que nous l'avons dit, sauf s'il est revêtu d'un enduit imperméable.

**CHAPITRE IV : MATERIELS ET
MATÉRIAUX UTILISÉS**

1 Matériels utilisés

En vu de notre étude, on a besoin d'un certain nombres d'appareils, les uns nous servent pour la confection du mortier, et d'autres pour prendre certaines mesures, on peut citer :

✓ Malaxeur

Il comporte une palette arrivée d'un mouvement planétaire susceptible de fonctionner à deux vitesse (dites lente et rapide) : (140 et 285) tr/mn.

✓ Moule

On utilise un moule normalisé, qui sert au moulage de trois éprouvettes prismatiques de mortier de section carrée (4×4×16 cm). Il est fabriqué en acier, et peut se démonté entièrement pour le démoulage.

✓ Table à chocs

Elle est apte à recevoir trois un moule de trois éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm. Elle permet d'appliquée des chocs aux moules en faisant chuter d'une hauteur de 15mm ± 0.3mm à la fréquence d'une chute par seconde.

✓ Maniabilimètre LCPC

Il sert à mesurer la maniabilité des mortiers, conformément à la norme française NF P 15-437. A noter que l'appareil de mesure est conforme à la version B de la norme française NF P 18-452. Cet appareil consiste à apprécier la consistance du mortier qui est caractérisée par le temps que mer le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide.

✓ Appareil de flexion

Il permet d'effectuer l'essai de la résistance à la traction par flexion, en plaçant l'éprouvette symétriquement sur deux mâchoires, qui servent d'appuis et une troisième est destinée à appliquer un moment fléchissant à mi-longueur

✓ Presse hydraulique

Elle permet d'appliquée des charges jusqu'à 150 KN avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s ± 200 N/s.

✓ L'entonnoir

Il permet de déterminer la masse volumique apparente d'un granulat.

✓ Pycnomètre

Cet appareil sert à la détermination de masse volumique réelle, ainsi qu'à l'absorption d'eau.

✓ Enccinte climatique

Cet appareil, est une armoire de conservation d'éprouvettes, ou on peut réglé l'ambiance climatique (température, et humidité), dans notre cas la température et de 20°C, et l'humidité relative de 65%.

NB : voir annexe

2 Matériaux utilisés

2.1 Granulats

Dans le cadre de notre étude, on a jugé important d'utiliser trois type de granulats, le premier est naturel, les deux autres recyclés.

Les granulats recyclés sont obtenus par concassage, du mortier de ciment pour le premier, et de (débris de briques de terre cuite + plâtre + mortier de ciment) pour le second. Le concassage a été réalisé au moyen d'un concasseur à cylindre, et d'un concasseur à mâchoires. Après concassage, les granulats ont été criblés d'obtenir une fraction granulaire du sable, qui est de 0/3.

Par la suite, les différents granulats utilisés sont désignés par :

○ S_N : sable naturel de mer (0/2,5) ;

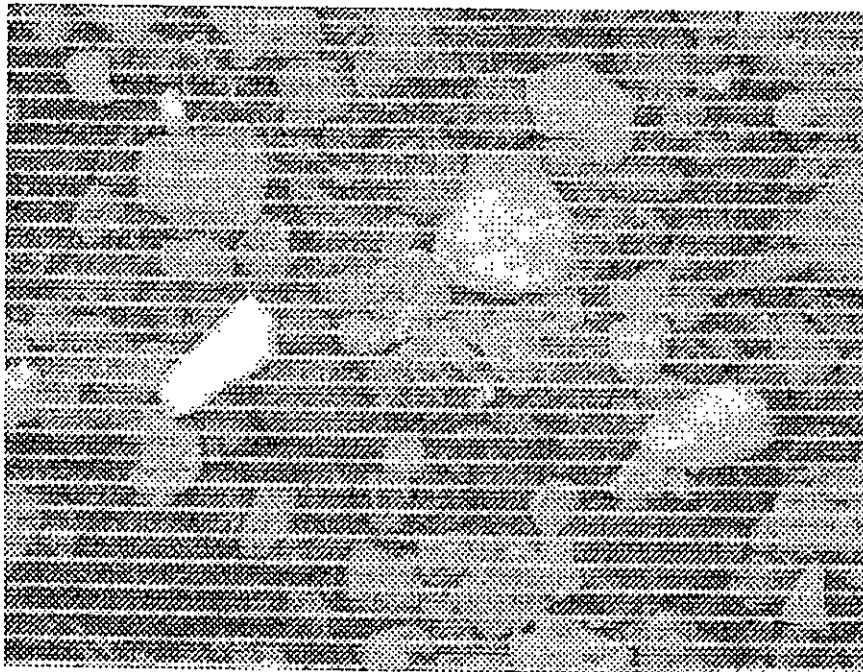


Figure 4.1 Vue du sable naturel prise avec le vidéomicroscope ($\times 50$)

On constat de cette figure que la forme des grains qui sont solides est plus ou moins ronde, avec une variété des couleurs ainsi que la composition chimique et minéralogique de ces grains, car on remarque la présence de grains à caractère silicieux. La figure montre aussi qu'il n'y a pratiquement pas de fines car la dimension des plus petits grains n'est pas négligeable devant les plus gros grains, ce ci peut présumé quand va avoir un équivalent sable important.

○ S_R : Sable recyclé issu du concassage de mortier de ciment (0/3) ;



Figure 4.2 Vue du sable recyclé prise avec le vidéomicroscope ($\times 50$)

On remarque de cette figure que les grains contrairement au premier sable, ont une forme plutôt angulaire, et ils sont plus gros, ce qui va engendrer apparemment une bonne cohésion entre eux, mais il y aura vraisemblablement une augmentation de la porosité ainsi que l'absorption d'eau, et une diminution de la masse volumique, on s'aperçoit aussi que le grain est constitué de quelques grains de sable d'origine qui sont assemblés entre eux par un ancien liant hydraulique.

○ S_{RB} : Sable recyclé issu du concassage de d'un mur de maçonnerie (brique + plâtre + mortier de ciment) (0/3) ;



Figure 4.3 Vue de S_{RB} prise avec le vidéomicroscope ($\times 25$)

La figure (4.3) montre bien les différents constituants de ce sable qui sont les déchets de terre cuite, le mortier de ciment concassé ainsi que le plâtre recyclé, la forme prédominante est la forme angulaire des différents grains ce qui va favoriser une bonne cohésion entre eux, mais aussi pour ce sable la porosité ainsi que l'absorption en eau, seront d'autant plus importantes que le sable S_{RB} du fait de la présence des déchets de terre cuite et celles du plâtre. On présume que la présence de ce dernier va influencer aussi sur les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau qui a comme constituant ce sable.

○ S_{NP} : Sable à base de sable naturel + plâtre recyclé

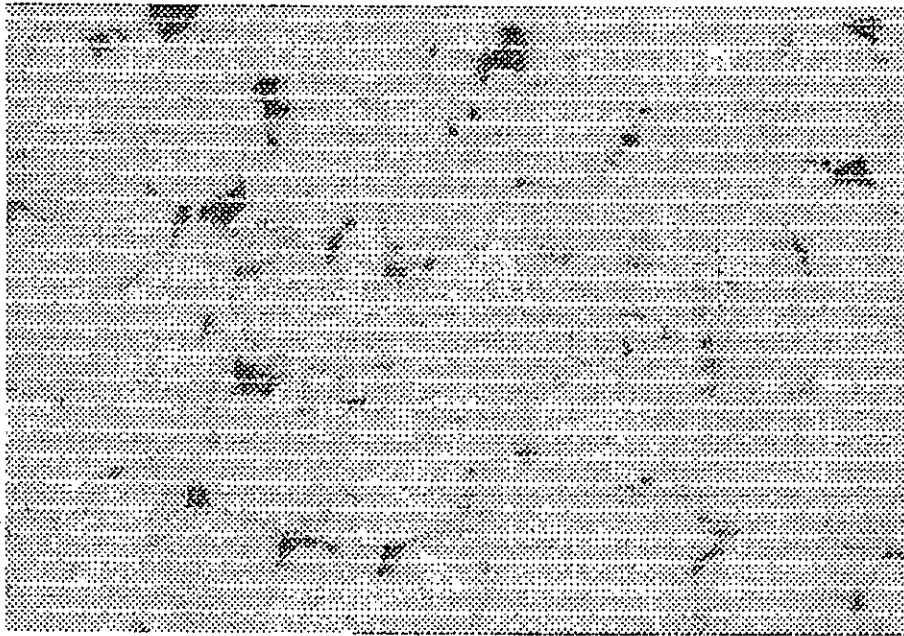


Figure 4.4 Vue du plâtre recyclé prise avec le vidéomicroscope ($\times 175$)

C'est un sable constitué du mélange (sable naturel « fig.4.1 » + plâtre recyclé « fig.4.4 »), les grains ont généralement une forme ronde, mais la présence du plâtre recyclé dans le mélange va certainement influencer sur les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau qui a comme constituant ce sable.

2.2 Ciment [24]

Le ciment utilisé, est un ciment de portland CPI CEM II/A 32,5, il est livré par la société de distribution sodismac, dans des sacs de 50 kg ;

2.2.1 Définition

Le ciment Portland composé CPI CEM II A 32.5 résulte de la mouture : D'au moins 80% de CLINKER PORTLAND, du complément à 100% d'un ou plusieurs constituants secondaire : (Laitier, filer calcaire,...) ;

‡ De sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

2.2.2 CARACTERISTIQUES PHYSICOMECHANIQUES

Les résistances à la compression du *CPJ CEM II A 32.5* font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître

Une valeur moyenne des résultats obtenus à 28 jours voisine de 450 Bars (45 MPa). La majorité des résultats obtenus se situe entre (32.5 et 52.5 MPa).

Ces deux dernières valeurs sont les limites inférieure et supérieure de la classe de résistance du *CPJ CEM II A 32.5*. En tout état de cause, les valeurs minimales garanties sont :

- ✓ 175 Bars (17.5 MPa) à 7 jours.
- ✓ 325 Bars (32.5 MPa) à 28 jours.
- ✓ Le temps de début de prise à 20°C,
- ✓ Mesuré sur pâte pure est supérieur à 90.

Le retrait à 28 jours du mortier normal est inférieur à 800 $\mu\text{m/m}$. L'expansion mesurée à chaud et à froid, sur éprouvette de pâte pure est inférieure à 10 mm.

2.2.3 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

- La proportion des sulfates (SO_3) dans le Ciment est inférieure à 4% ;
- La teneur en chlorures (Cl^-) est inférieure à 0.10% ;

L'addition des sels solubles tels que chlorures ou sulfates est interdite.

2.2.4 EMPLOIS COURANTS

- ✓ Maçonnerie
- ✓ Béton courant (non armé ou faiblement armé : remplissage fondations, portées réduites, décoffrage différé) ;
- ✓ Béton armé sollicité : structure porteuse, etc... ;
- ✓ Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis, etc..) ; Stabilisation des sols et graves ciment ;
- ✓ Bétons routiers ;
- ✓ Travaux en grandes masses moyennement sollicités qui exigent une chaleur d'hydratation modérée ;
- ✓ Travaux de fondation en milieu non agressif.

2.2.5 CONTRE-INDICATION

- ✓ Ouvrages en milieux agressifs (eaux salines, eaux séléniteuses,...). Travaux souterrains, fondations importantes en milieux agressifs.
- ✓ Liants incompatibles.
- ✓ Lorsque l'aspect entre en ligne de compte; il convient de prêter une attention particulière aux constituants qui peuvent modifier la teinte.

2.2.6 RECOMMANDATIONS ET CONSEILS

Il convient de s'attacher plus particulièrement :

a) Lors de la préparation du béton :

- ✓ Au choix du ciment pour lequel il convient de s'assurer qu'il satisfait à l'essai de stabilité.
- ✓ Au dosage en ciment : un excès provoque une tendance à la fissuration, une insuffisance un manque d'homogénéisation dans la résistance.
- ✓ A la propreté des granulats et à l'élimination des sables et granulats argileux.
- ✓ A limiter la quantité d'eau en fonction des moyens de serrage.

b) Lors de la mise en œuvre :

- ✓ A ne pas couler le béton au contact d'élément poreux secs.
- ✓ A éviter toute ségrégation du béton (éviter les grandes hauteurs de chute,...).
- ✓ A atteindre la compacité maximale compatible avec les moyens de mise en œuvre.
- ✓ A lier au mieux les gâchées successives en s'attachant notamment à vibrer convenablement la zone de transition entre les gâchées.

c) Pendant le durcissement :

- ✓ A éviter la dessiccation rapide des zones superficielles en maintenant le béton humide ou en employant des produits de cure.
- ✓ Bien que l'évolution des caractéristiques du béton permette des décoffrages rapides, il faut toutefois éviter qu'ils ne soient prématurés afin de conserver au mieux les résistances à long terme.

2.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage, est une eau ordinaire de robinet sans traitement supplémentaire

3 Confection du mortier

Les composants nécessaires à la confection du mortier sont malaxés, jusqu'à obtention d'une pâte bien homogène. Ensuite, le mortier ainsi préparé est versé dans des moules de 4x4x16 cm. On fait alors subir à ces éprouvettes une série de vibration sur la table à chocs. Puis la surface du mortier est nivelée au ras des bords avec une règle métallique plate. Afin d'éviter l'évaporation de l'eau de gâchage, les éprouvettes sont alors couvertes avec un film plastique. Après démoulage des éprouvettes à 24 heures, la conservation se fait soit dans l'eau, soit dans à l'air en armoire de conservation à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ avec une humidité relative de $65\% \pm 5\%$ jusqu'au jour de l'essai.

*CHAPITRE V : LES ESSAIS
REALISÉS*

1 INTRODUCTION

Afin d'atteindre le but rechercher de notre étude, une série d'essais s'impose, et qui sont issues des normes appropriées. On peut subdiviser ces essais en deux catégories, L'une pour l'identification du matériau et l'autre pour les caractéristiques mécanique de ce dernier.

Ces essais, servent aussi à caractériser les matériaux, ainsi que pour faire la comparaison entre les granulats recyclés, et les granulats naturels. Le tableau 1.6 montre les différents essais effectués ainsi que la norme correspondante à chaque essai. Ces essais vont nous renseigner sur la qualité des granulats et sur la possibilité d'utiliser ces granulats dans la construction du bâtiment.

Travaux, essais ou analyses	Norme	S _N 0/2,5	S _R 0/3
Densité et absorption	NF P 18-555 Déc. 90	X	X
Equivalent de sable	NF P 18-598 Oct. 91	X	X
Analyse granulométrique	NF P 18-560 Sept. 90	X	X
Module de finesse	Mode opératoire	X	X

Tableau 5.1 Essais effectués sur les matériaux

2 LES ESSAIS D'IDENTIFICATION DU MATERIAU [16]

En vue de leur utilisation dans la confection des mortiers et des blocs de maçonnerie, les sables doivent être soumis à des essais au laboratoire qui sont : l'analyse granulométrique, module de finesse, absorption d'eau, compacité et porosité, équivalent de sable.

2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par tamisage a été effectuée séparément pour les parties grossières et fines. L'analyse permet de déterminer la distribution en poids des particules d'un sable suivant leurs dimensions et de nous renseigner sur le pourcentage d'éléments inférieurs à 80 microns. L'essai est effectué conformément à la norme française P 18-560 [27]. Le résultat de cette analyse est représenté sous la forme d'une courbe.

2.2 Module de finesse

C'est un coefficient servant à caractériser la grosseur d'un sable pour béton. Un sable grossier est représenté par un coefficient élevé ($2.8 < M_f < 3.2$), un sable fin par un coefficient plus faible ($1.8 < M_f < 2.2$) et un sable moyen par ($2.2 < M_f < 2.3$) qui est préférentielle pour la confection des bétons. Ce module est défini comme étant égal au centième de la somme des refus cumulés aux tamis : 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 mm. C'est une caractéristique intéressante car, elle permet le calcul rapide de la correction d'un sable

mais reste, à elle seule, insuffisante pour apprécier la qualité globale d'un sable à béton. Elle constitue cependant, parmi d'autres, une indication très précieuse à condition de la rattacher à un tracé granulométrique.

2.3 Masses volumiques

La mesure des masses volumiques réelles des deux sables a été effectuée conformément à la norme française P 18-555 [28]. La mesure de la masse volumique apparente des deux sables a été déterminée selon la méthode de l'entonnoir. Les masses volumiques des deux sables ont été effectuées par la méthode de la mesure au pycnomètre.

2.4 Absorption d'eau

Cet essai est effectué conformément à la norme française P 18-555 [28]. Pour cela, un échantillon de sable est plongé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique normale. A l'issue des 24 heures, on effectue sa pesée. Puis on calcule l'augmentation de masse par rapport à sa masse sèche. Enfin on obtient le coefficient d'absorption d'eau en effectuant le rapport de l'augmentation de masse à la masse sèche initiale.

2.5 Compacité et porosité

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides contenus dans les grains et accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon. La compacité est le volume plein du matériau sur le volume apparent. On peut dire que la porosité représente le complément à l'unité de la compacité. Notons que les différents volumes ont été déterminés à partir des masses volumiques données dans le tableau 4.7 selon la norme NF P 18-555 [28].

2.6 Equivalent de sable

Cet essai de a pour objet d'évaluer la quantité de fines argileuses et de poussières contenues dans les sols fins. Il permet donc de mesurer la propreté d'un sable. Il est réalisé conformément à la norme NF P 18 – 598 [29]. L'essai est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carré de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité des éléments fins ; en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les sédiments sableux et les éléments fins qui flocculent.

3 Caractéristiques mécaniques

Pour ces caractéristiques, nous nous sommes intéressés à l'utilisation des sables, du mortier de ciment concassé, et de (brique + plâtre + mortier de ciment) concassés également, pour la confection de mortiers à différent dosages de ciment (250, et 350 kg par mètre cube de sable sec), pour chaque dosage en ciment nous avons réalisés quatre dosages en eau. De nombreux essais ont été effectués, sur :

- Les propriétés rhéologiques ;
- Les résistances à la compression et à la traction par flexion après cure dans l'eau à 7 et 28 jours ;
- La masse volumique aux diverses échéances ;

- Les propriétés physiques, telles que :
 - ✓ Le retrait ;
 - ✓ L'absorption d'eau par capillarité ;

3.1 Essais de maniabilité

Le degré d'ouvrabilité s'il existait toutefois un moyen de le spécifier et de le mesurer serait fonction de l'habileté du maçon, de la maniabilité du mortier et de plusieurs propriétés du support telles que l'absorption d'eau par le support, l'état de surface, etc... La méthode utilisée par le maçon pour juger l'ouvrabilité est basée sur sa façon personnelle de travailler et sa formation selon les traditions. La méthode LCPC que nous avons retenue consiste à mesurer le temps mis par un mortier initialement placé dans le grand compartiment du Maniabilimètre pour s'écouler sous vibration et atteindre un repère horizontal fixe, gravé sur une paroi du second compartiment. Le temps écoulé entre le déclenchement de la vibration par soulèvement de la cloison amovible et l'affleurement du mortier au trait repère représente le résultat de la mesure.

3.2 Essai de résistance à la traction par flexion

L'essai permet de déterminer la contrainte de traction d'un mortier. Il est mené conformément à la norme européenne EN 196-1 [30]. Cet essai est réalisé sur l'appareil de flexion en plaçant l'éprouvette 4 x 4 x 16 cm symétriquement sur deux mâchoires. Ces dernières servent d'appuis et une troisième est destinée à appliquer un moment fléchissant à mi-longueur. L'essai est répété sur trois éprouvettes identiques afin de trouver la résistance moyenne en traction par flexion R_t . La résistance à la rupture en traction par flexion est donnée au moyen de la formule suivante :

$$R_t = 1.5 \times F_t \times \frac{L}{b^3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

L : Distance entre axe des rouleaux d'appui de l'éprouvette (4 x 4 x 16 cm) en mm t.q : ($L = 100\text{mm}$).

R_t : Résistance à la traction en MPa.

F_t : Charge à la rupture en N.

b : Largeur de la section carrée du prisme en mm ($b = 40 \text{ mm}$).

Dans notre étude la valeur de la résistance à la traction par flexion est directement lue en N/cm^2 sur une réglette graduée placée sur le bras de la machine de flexion.

3.3 Essai de résistance à la compression

L'essai consiste à comprimer jusqu'à écrasement un échantillon du matériau étudié. Il est mené conformément à la norme EN 196-1 [31]. Il s'effectue à la suite de l'essai de traction par flexion et porte par conséquent sur les deux morceaux obtenus après rupture d'une éprouvette.

Cet essai est réalisé sur une presse hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150 kN avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. L'échantillon est placé au milieu du plateau de la presse. La surface de contact entre l'éprouvette et le plateau de compression est de 16 cm^2 ($4 \times 4 \text{ cm}$). L'augmentation de la charge se fait automatiquement et la force de rupture est indiquée en kN par une aiguille supplémentaire qu'on doit remettre à zéro après chaque essai. La résistance à la compression est donnée par la relation suivante :

$$R_c = F_c / 1600 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

R_c : Résistance à la compression (MPa).

F_c : La charge maximale à la rupture (en Newtons).

La figure 5.1 montre le dispositif de l'écrasement à la compression :

Plateau d'application de la compression

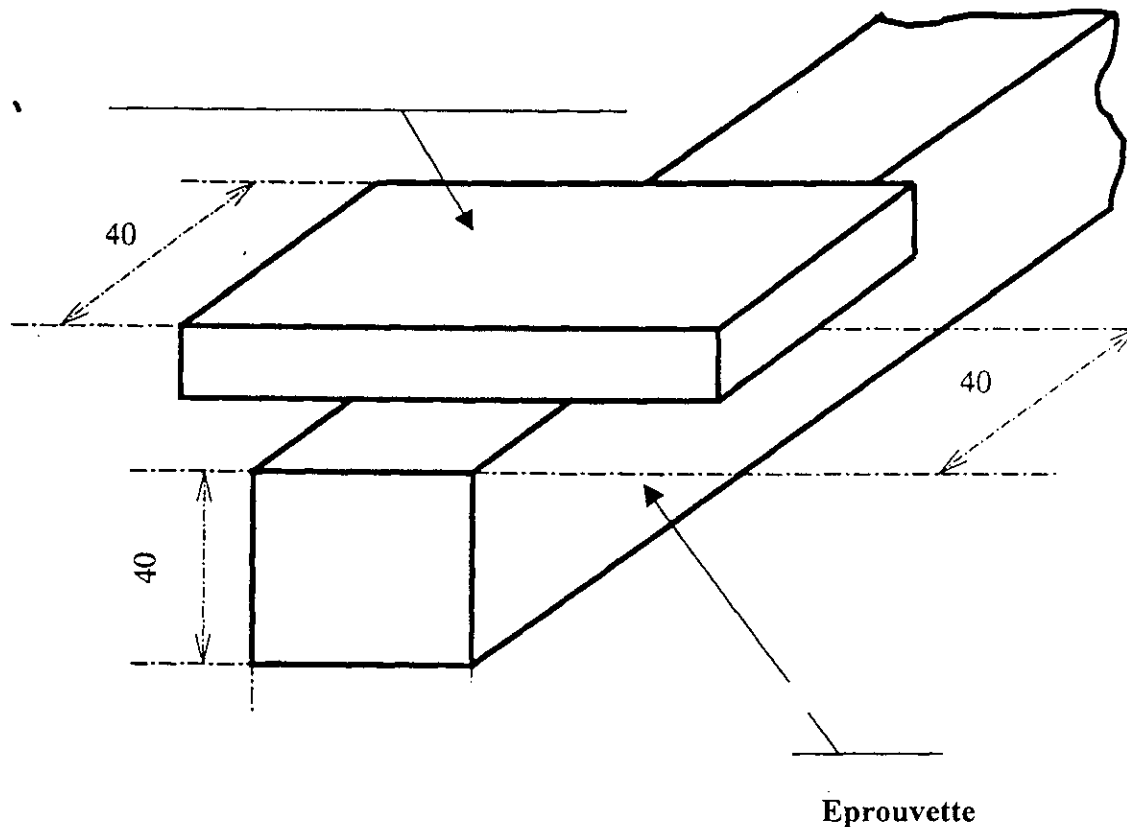


Figure 5.1 Dispositif de l'écrasement à la compression

3.4 Essai D'absorption capillaire

La capacité d'absorption d'eau d'un mortier donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides et donc des pores. C'est aussi une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du mortier durci. L'essai d'absorption capillaire est réalisé

conformément à la norme EN 480-5 [32]. Cet essai a été effectué sur des éprouvettes de mortier de section $4 \times 4 \text{ cm}^2$ et de longueur 16 cm, préalablement séchées à l'étuve jusqu'à masse constante. Les éprouvettes ont été ensuite posées selon leur section transversale en contact avec l'eau dans un bac où la profondeur d'immersion a été maintenue constante et égale à 5 mm comme le montre la figure 5.2.

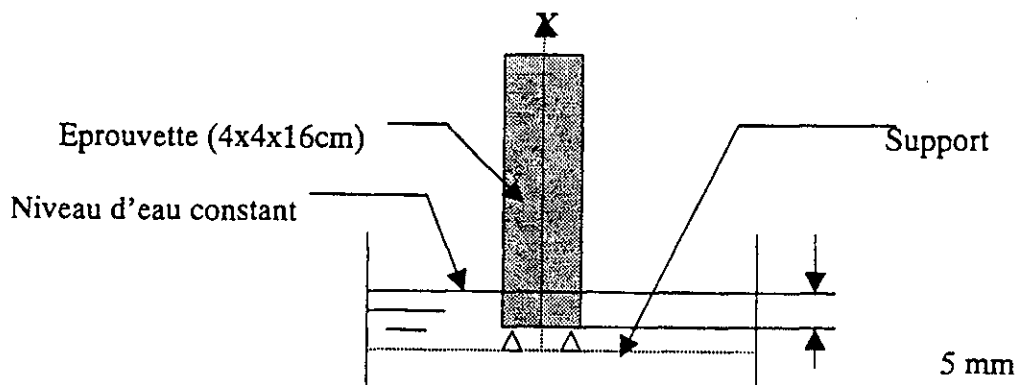


Figure 5.2 Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

A chaque échéance, l'éprouvette a été sortie du récipient, essuyée légèrement puis pesée et replacée dans le récipient. Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire est exprimée en grammes par millimètre carré, par la formule :

$$CA = (M_j - M_0) / S$$

M_0 : la masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes.

M_j : la masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes.

S : la surface de la base de l'éprouvette où S est égale à 1600 cm^2 .

L'absorption capillaire sera la moyenne des absorptions CA obtenues sur 3 éprouvettes identiques de mortier.

3.5 Mesure du retrait

Dans certaines conditions de fabrication, d'emploi et de conservations, les mortiers peuvent subir une diminution du volume apparent, appelé retrait, qui est susceptible de produire des fissurations plus ou moins importantes. Ces fissures dues au retrait peuvent, selon leurs dimensions, influencer sur la stabilité de la construction ; et, si elles sont assez profondes, diminuer l'étanchéité des massifs où elles se produisent.

L'essai de retrait est réalisé conformément à la norme NF P15-433 [33]. Il consiste à mesurer en fonction du temps, la variation de longueur d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$, par rapport à sa longueur d'origine. Les éprouvettes sont conservées après démoulage dans une salle dont la température est maintenue à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et l'humidité relative à $50\% \pm 5\%$.

Les mesures de retrait sont généralement effectuées sur 3 éprouvettes aux échéances suivantes :

- Au démoulage, mesure d'origine des variations.
- A 3, 7 et 28 jours après la confection des éprouvettes.

Dans notre travail, nous avons continué la mesure de retrait jusqu'à 90 jours. Pour chaque éprouvette et à chaque échéance sont calculés les rapports :

$$(\Delta L \times 10^6) / L$$

ΔL : Variation de longueur par rapport à la longueur d'origine.

L : Longueur de base prise égale à 160 mm.

**CHAPITRE VI : RÉSULTATS ET
INTERPRÉTATIONS**

1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des mortiers confectionnés à partir des deux sables cités précédemment. Ils s'agit d'un sable issu uniquement du concassage du mortier de ciment dans un premier temps, et dans un deuxième temps des matériaux qui constituent un mur de maçonnerie à double parois en briques et dont une face est recouverte d'enduit de mortier de ciment et l'autre d'enduit de plâtre (sable recyclé). Ces sables ont été utilisés secs sans prémouillage préalable.

Un ciment CPJ CEM II/A 32,5 a été utilisé pour confectionner des éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm de mortier.

Pour le sable recyclé qui est à base de mortier de ciment, deux dosages en ciment ont été fixés : 250 et 350 Kg/m^3 de sable sec. A chaque dosage en ciment, nous avons choisi quatre dosages en eau de telle sorte que l'on fasse varier le rapport eau/ciment (E/C) afin d'étudier des mortiers de différentes maniabilités (mortier ferme et mortier plastique). Huit mélanges ont été préparés et plusieurs éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$ cm) ont été fabriquées afin de pouvoir effectuer les essais mécaniques aux diverses échéances.

Pour l'autre sable recyclé qui est une reconstitution du mélange de matériaux d'un mur en briques creuses double cloisons (mortier de ciment + plâtre + brique de terre cuite) concassés, ainsi que le sable qui est à base de (sable naturel + plâtre recyclé), un seul dosage en ciment a été fixé : 350 Kg/m^3 de sable sec. A chaque dosage en ciment, on a effectué trois dosages en eau c'est-à-dire trois rapports de (E/C). Huit mélanges ont été préparés également, ainsi que plusieurs éprouvettes prismatiques pour effectuer les mêmes essais que le sable précédent.

Plusieurs paramètres ont été mis en évidence afin de montrer le comportement du mortier à base de sables recyclés. Pour ces essais toutes les éprouvettes ont été conservées dans l'eau, à l'intérieur d'un grand bac, et à température constante qui est de 20°C .

2 ESSAIS D'IDENTIFICATION

2.1 Sable recyclé à base de mortier de ciment

2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

Le résultat de cette analyse des deux sables naturel et recyclé est présenté dans la figure 6.1

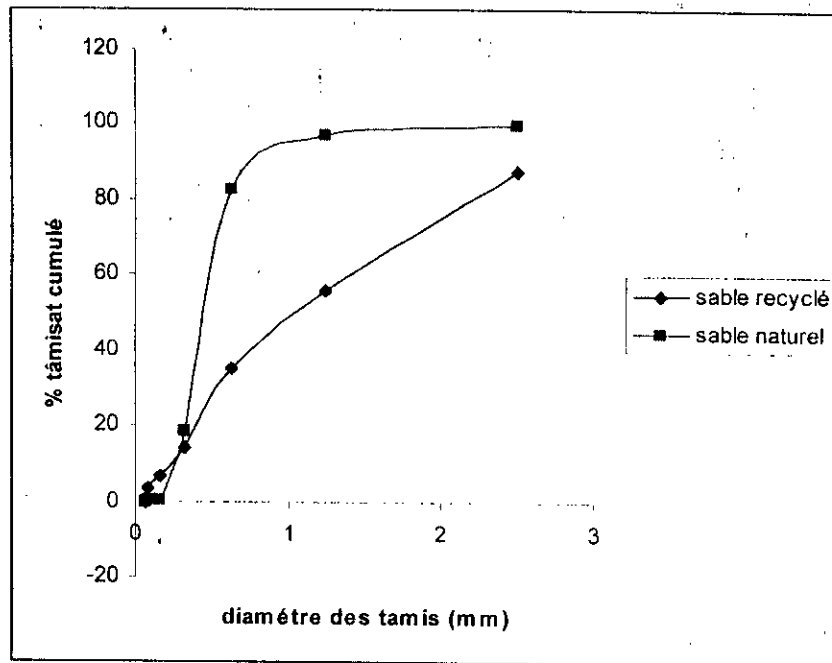


Figure 6.1 Distribution granulométrique des deux sables

La courbe ci-dessus (fig 7.1) montre que les deux sables sont différents du point de vue granulométrique. Le sable naturel contient un grand pourcentage des grains de diamètre compris entre 0.315 et 0.63 mm. On voit bien que le sable recyclé est un sable grossier, car la courbe granulométrique de ce dernier décrit une décroissance du pourcentage des tamisats cumulés en fonction de la diminution des diamètres des tamis, car on remarque qu'il contient 87.17% de grains supérieur à 1.25mm, néanmoins ce sable contient plus de fines c'est-à-dire de diamètre inférieur à 0.16mm, tel que le pourcentage des fines de diamètre inférieur à 80 μ m pour notre sable recyclé est de 1.5% , comparant à celle du sable naturel qui est de l'ordre de 0.1%. Ces résultats sont confirmés par la photo prise au moyen du vidéomicroscope (fig.5.1 et fig.5.2 chap 4).

2.1.2 Module de finesse

Pour le sable recyclé : $M_f = 3,015$ donc $2.8 < M_f < 3.2 \rightarrow$ sable grossier acceptable ;
 Pour le sable naturel : $M_f = 2.02$ donc $1.8 < M_f < 2.2 \rightarrow$ sable est fin ;

On remarque que les deux sables utilisés, sont acceptables pour la confection d'un béton hydraulique et mortiers, sauf que le sable recyclé est plus ou moins grossier et peut entraîner par la suite le risque de ségrégation du béton. Ceci est confirmé par la photo au vidéomicroscope (fig.5.1, fig.5.2) où l'on voit bien que les grains du sable recyclé sont globalement plus gros que ceux du sable naturel.

2.1.3 Masses volumiques

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 6.1

	Masse volumique apparente t/m^3	Masse volumique absolue t/m^3	Masse volumique réelle t/m^3
S_N	1.43	2.4	2.6
S_R	1.14	2.21	2.31

Tableau 61 Masse volumique des deux sables

D'après les résultats obtenus on constate que les masses volumiques du sable recyclé sont plus faibles que celles du sable naturel de 10 à 20 %, ce qui est conforme avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs [34,35] où en moyenne une chute de plus de 10% de la masse volumique des granulats de béton concassé, par rapport au granulats originaux a été observée. Cette chute de masse volumique du sable de mortier concassé est due au fait que les granulats recyclés sont constitués d'un aggloméré de granulats naturel et d'une matrice à base de ciment (cf fig 4.2 chap4). Cette dernière est d'une densité relativement faible d'où la légèreté du granulat recyclé.

On remarque aussi qu'avec une masse volumique apparente de $1.14 t/m^3$ le sable recyclé s'avère moins lourd de près de 1/4. La relative faiblesse de l'écart existant entre les masses volumiques absolues des deux sables, permet de dire que cette légèreté est due principalement à la porosité des grains du sable recyclé ainsi qu'au fait que ce sable est plutôt grossier.

2.1.4 Absorption d'eau

Les résultats de cet essai sont donnés dans le tableau 7.2

Type du sable	Coefficient d'absorption d'eau %
S_N	0.1
S_R	4.25

Tableau 6.2 Coefficient d'absorption d'eau des deux sables

On remarque, que le sable recyclé absorbe beaucoup plus d'eau que le sable naturel, car le coefficient d'absorption d'eau du sable recyclé est de près 43 fois supérieur à celui d'un sable naturel. A titre de comparaison M^{clle} Bedjou avait trouvé un coefficient de 5,8 pour le sable de briques concassées. Ceci montre la grande porosité des grains du mortier de ciment concassés, et dont le sable recyclé s'avèrera hydrophile. On peut donc présager qu'il faudra de grosses quantités d'eau pour confectionner des bétons et mortiers à base de sable de recyclage.

2.1.5 Compacité et porosité

Le tableau 6.3 donne les résultats trouvés pour les deux sables.

	Compacité %	Porosité %
S _N	59.58	40.42
S _R	51.58	48.42

Tableau 6.3 Compacité et porosité des deux sables

On remarque diminution de la compacité du sable recyclé par rapport au sable naturel et qui est de l'ordre de 13.43%. Le sable recyclé est peu compact et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au sable naturel. Ceci confirme nos commentaires relatifs au coefficient d'absorption d'eau.

2.1.6 Equivalent sable

Le tableau 6.4 regroupe les résultats trouvés pour les deux sables.

	Equivalent de sable	Critère de la norme
S _N	99	≥70 (65 et 60 pour les sables concassés et broyés)
S _R	76.32	

Tableau 6.4 Equivalent sable des deux sables

D'après le tableau 7.4, les deux sables sont propres car leur équivalent de sable est conforme à la limite donnée par la norme NF P 18-5'98 [59].

2.2 Sable recyclé à base de brique+plâtre+mortier de ciment(S_{RB}), et sable à base de sable naturel+plâtre(S_{NP})

Afin de simuler un sable issu de la démolition d'un mur en brique double cloisons, nous avons reconstitué un mélange équivalent avec 1% de mortier de ciment 10% de plâtre et 79% de brique concassés. Ce sable de recyclage est désigné par l'abréviation S_{RB} . De plus, afin de déterminer l'effet de la présence du plâtre dans ce mélange nous avons aussi étudié un sable issu du mélange de plâtre concassé à 10% et 90% de sable naturel. Ce dernier est désigné par l'abréviation S_{NP} .

2.2.1 Analyse granulométrique par tamisage

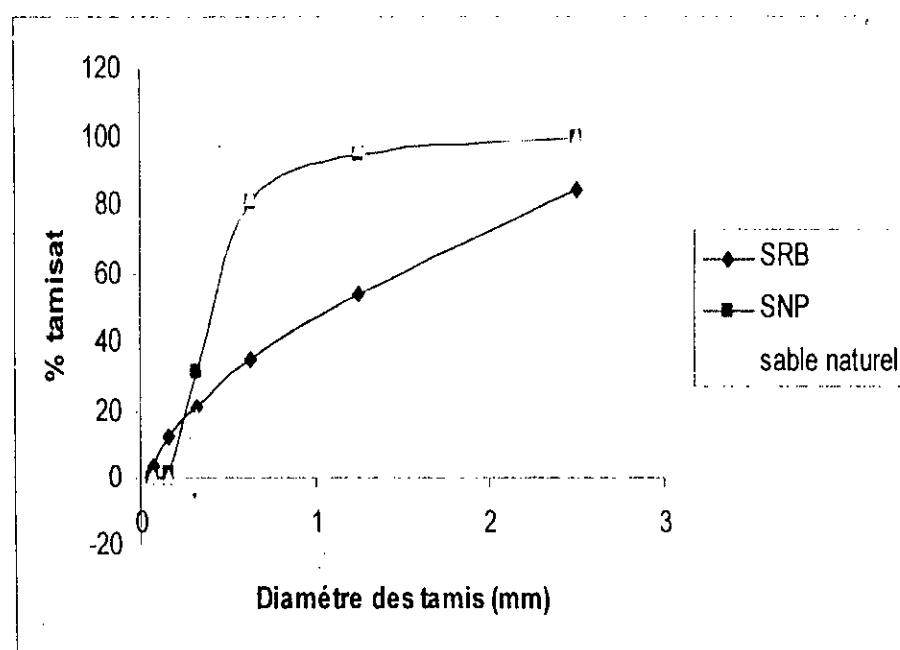


Figure 6.2 Distribution granulométrique des trois sables

La courbe ci-dessus (fig.6.2) montre que les deux sables S_N et S_{NP} sont très proches, du fait que leur seule différence est la présence de 10% de plâtre pour le sable S_{NP} d'où l'apparition d'une quantité de fines supérieures à celles du sable naturel. Ce qui n'est pas le cas pour le sable S_{RB} différent du point de vue granulométrique par rapport au deux autres sables. En effet, il contient un grand pourcentage des grains de diamètre compris entre 0.63 et 2.5 mm, néanmoins ce sable contient plus de fines c'est-à-dire de diamètre inférieur à 0.16mm, tel que le pourcentage des fines de diamètre inférieur à 80 μ m pour notre sable recyclé est de 1.7%, alors que celle du sable naturel est de l'ordre de 0.1%, et celle du sable S_{NP} de l'ordre de 0.7%. Ces résultats sont confirmés par la photo prise au moyen du vidéomicroscope (fig.4.1, fig.4.3, fig.4.4) qui montre bien l'aspect des différents grains obtenus.

2.2.2 Module de finesse

Pour S_{RB} le module de finesse est de 2.92 donc $2.8 < M_f < 3.2$ c'est-à-dire que c'est un sable grossier ;

Pour S_{NP} on a un module de finesse qui est de 1.92 donc $1.8 < M_f < 2.2$ donc c'est un sable fin, ce qui est aussi le cas pour le sable naturel S_N qui a un module de finesse de 2.02 ;

On constate que ces trois sables, sont acceptables pour la confection d'un béton hydraulique et d'un mortier. La forme des grains est plutôt ronde (roulé), pour le sable naturel tandis que pour les sables recyclés les grains sont plutôt anguleux car issus d'un concassage.

2.2.3 Masses volumiques

Les résultats sont représentés dans le tableau 6.5

	Masse volumique apparente t/m^3	Masse volumique absolue t/m^3	Masse volumique réelle t/m^3
S_N	1.43	2.4	2.6
S_{RB}	1	2.05	2.1
S_{NP}	1.32	2.28	2.45

Tableau 6.5 Masse volumique des trois sables

On constate que les masses volumiques du sable S_{RB} sont nettement plus faibles que celles du sable S_{NP} qui sont eux même plus faible que celles du sable S_N , ce qui est conforme avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs [34,35].

On remarque aussi qu'avec une masse volumique apparente de $1 t/m^3$ pour le sable recyclé S_{RB} il est moins lourd de près de la moitié. Or pour le sable S_{NP} on remarque qu'il a une masse volumique apparente de $1.32 t/m^3$, qui est assez proche de celle du sable naturel du fait qu'il n'y a que 10% de plâtre recyclé dans ce sable, mais néanmoins il est moins lourd de près de 1/12. La relative faiblesse de l'écart existant entre les masses volumiques absolues des deux sables (S_N , S_{NP}) et du sable S_{RB} , permet de dire que cette légèreté est due principalement à la porosité des grains du sable recyclé S_{RB} .

2.2.4 Absorption d'eau

Type du sable	Coefficient d'absorption d'eau %
S_N	0.1
S_{RB}	5.71
S_{NP}	2.8

Tableau 6.6 Coefficient d'absorption d'eau des trois sables

On remarque, que le sable recyclé S_{RB} absorbe beaucoup plus d'eau que le sable naturel, et

le sable S_{NP} car le coefficient d'absorption d'eau du sable recyclé S_{RB} est de près 57 fois supérieur à celui d'un sable naturel S_N , et de 2 fois à celui du sable S_{NP} qui a à son tour un coefficient supérieur de 28 fois à celui du sable S_N . Ceci montre la grande porosité des grains du sable S_{RB} concassé, et dont le sable recyclé s'avère être très hydrophile. La porosité du sable S_{NP} est due essentiellement à la présence du plâtre recyclé dans ce sable. On peut donc présager qu'il faudra de grosses quantités d'eau pour confectionner des bétons et mortiers à base de sable de recyclage.

2.2.5 Compacité et porosité

Le tableau 6.7 donne les résultats trouvés pour les deux sables.

	Compacité %	Porosité %
S_N	59.58	40.42
S_{RB}	48.78	51.12
S_{NP}	57.89	42.11

Tableau 6.7 Compacité et porosité des trois sables

On remarque diminution de la compacité du sable recyclé S_{RB} par rapport au sable naturel et qui est de l'ordre de 18.13%, et du sable S_{NP} qui est de l'ordre de 3.46 %. La faible diminution de la compacité du sable S_{NP} par rapport au sable S_N est due à la faible quantité du plâtre recyclé qui se trouve dans ce sable. Le sable recyclé est peu compact et par conséquent beaucoup plus poreux par rapport au sable naturel. Ceci confirme nos commentaires relatifs au coefficient d'absorption d'eau.

2.2.6 Equivalent sable

	Equivalent de sable	Critère de la norme
S_N	99	≥70 (65 et 60 pour les sables concassés et broyés)
S_{RB}	61	
S_{NP}	92	

Tableau 6.8 Equivalent sable des trois sables

D'après le tableau 6.8 les trois sables sont propres car leur équivalent de sable est conforme à la limite donnée par la norme NF P 18-598 [29].

3 Caractérisation des mortiers

3.1 Sable recyclé à base de mortier de ciment

3.1.1 Étude de la maniabilité du mortier frais

Les résultats de la maniabilité (le temps d'écoulement au maniabilimètre LCPC), des différents mélanges préparés, sont représentés dans le tableaux ci-dessous.

Les figures 6.3 (a), 6.3 (b), représentent l'évolution de maniabilité des mortiers en fonction du rapport E/C.

Mortier 350 kg/m ³	E/C	0,86	0,9	0,92	0,95
	Maniabilité(s)	15	13	6	4
Mortier 250 kg/m ³	E/C	1	1,2	1,25	1,3
	Maniabilité(s)	17	12	4	3

Tableau 6.9 Maniabilité des mortiers préparés

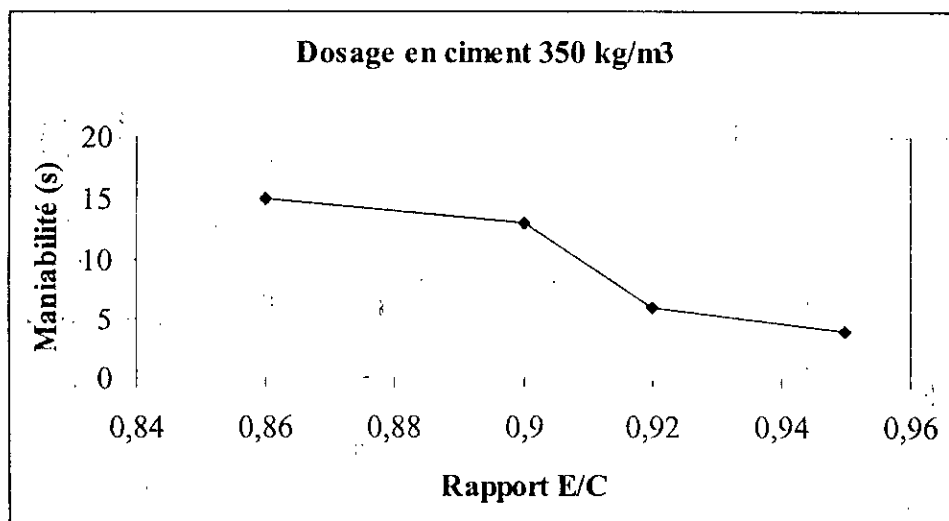


Figure 6.3 (a) Evolution de la maniabilité en fonction du rapport E/C pour un dosage en ciment de 350 kg/m³

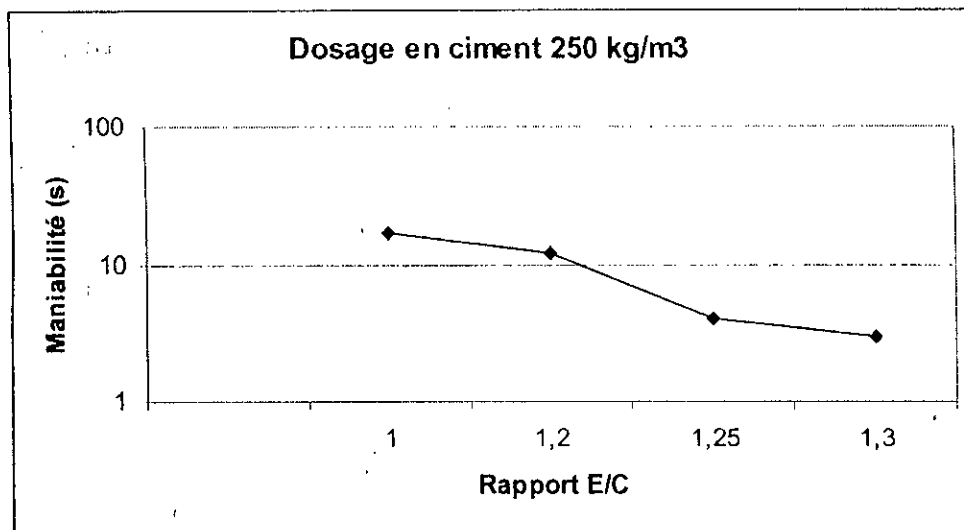


Figure 6.3 (b) Evolution de la maniabilité en fonction du rapport E/C pour un dosage en ciment de 250 kg/m³

D'après les résultats, et les graphes obtenus, on peut constater que les rapports E/C sont beaucoup plus élevés que pour les mortiers ordinaires, et peuvent atteindre la valeur de 0.95 pour le dosage 350 kg/m³ et la valeur de 1.3 pour le dosage de 250 kg/m³, cela est dû à la forte absorption d'eau du sable recyclé due à sa porosité. En effet, le coefficient d'absorption en eau du sable recyclé est plus élevé que celui du sable ordinaire.

On remarque, aussi que le besoin en eau du mélange à base de sable recyclé est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que les grains du sable recyclé étant très gourmands en eau, moins il y a de ciment et plus la concentration en grain de sable recyclé augmente et donc plus le mélange est hydrophile.

On peut diminuer le rapport E/C en ajoutant au mélange (ciment, sable, eau) un superplastifiant

3.1.2 La masse volumique apparente

Des mesures de masse volumique apparente ont été réalisées au démoulage à 24 heures et pour chaque âge correspondant aux échéances d'écrasement des éprouvettes du mortier. Les valeurs moyennes des masses volumiques pour les différents mortiers envisagés sont mentionnées dans le tableau 6.10.

Dosage en ciment Kg/m ³	Notation	Rapport E/C	Masse volumique apparente (t/m ³)	
			7 j	28 j
350	M _{A1}	0.86	1.94	2.03
	M _{A2}	0.90	1.93	2
	M _{A3}	0.92	1.94	1.99
	M _{A4}	0.95	1.96	1.98
250	M _{B1}	1	1.76	1.91
	M _{B2}	1.2	1.90	1.95
	M _{B3}	1.25	1.93	1.97
	M _{B4}	1.3	1.89	1.90

Tableau 6.10 Masses volumiques apparentes des mortiers de sable recyclé

3.1.2.1 Evolution de la masse volumique apparente dans le temps

La figure ci-après illustre l'évolution des masses volumiques apparentes pour les deux dosages en ciment et pour différents ages

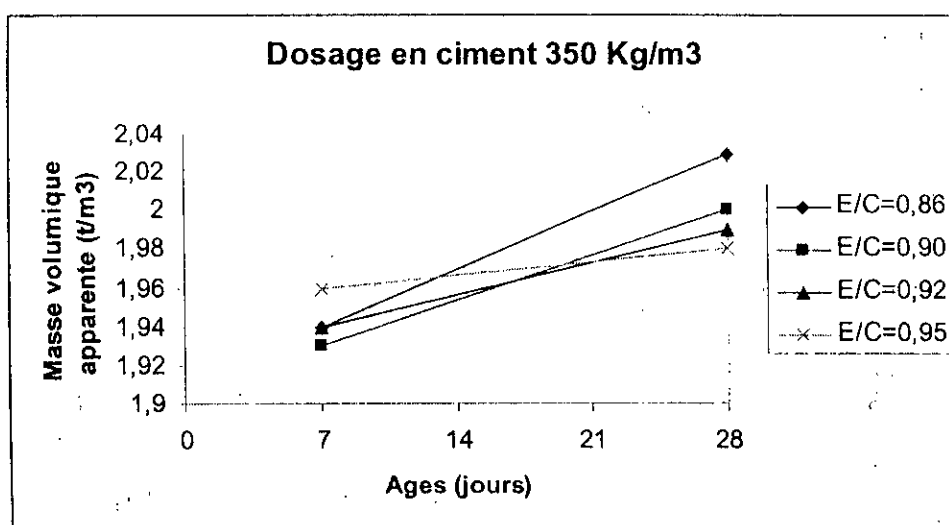


Figure 6.4 (a) Evolution de la masse volumique apparente en fonction du temps pour le dosage 350 kg/m³

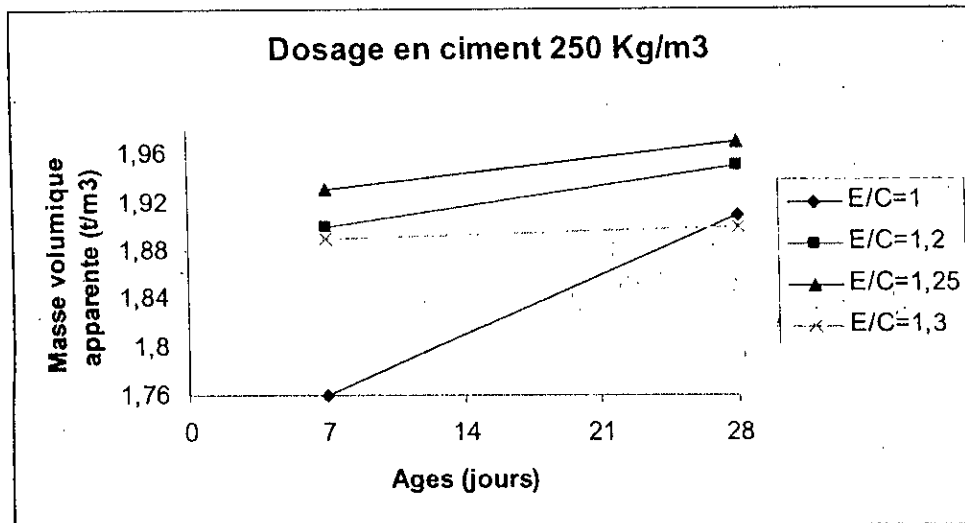


Figure 6.4 (b) Evolution de la masse volumique apparente en fonction du temps pour le dosage 250 kg/m³

On remarque que Les masses volumiques sont plus légères que celles d'un mortier ordinaire et qui augmentent légèrement dans le temps, car le mortier a certainement hérité de la porosité du nouveau sable le constituant, cette dernière est due à la forme anguleuses des grains de ce sable ainsi qu'à leurs grosseurs, et cela est confirmé par la photo prise avec le vidéomicroscope (fig 4.2). Cette augmentation de la masse volumique est due à la porosité des mortiers obtenus qui sont conservés dans l'eau sous forme d'éprouvettes prismatiques, d'où leurs continuités à absorber l'eau dans le temps. C'est peut être aussi lié au fait que l'absorption d'eau par les pores du sable à base de mortier de ciment concassé ralentit quelque peu l'hydratation du ciment, qui a tendance à continuer à un rythme soutenu entre 7 et 28 jours contrairement aux mortiers ordinaires pour lesquels le phénomène se ralentit nettement au-delà de 7 jours.

Mais néanmoins, pour les plus grands rapports E/C des deux dosages, c'est-à-dire pour E/C=0,95 et E/C=1,3, on constate une modeste augmentation de la masse volumique par rapport aux autres rapports. Ceci est dû à l'importante quantité d'eau de gâchage mise pour la confection de ces deux mortiers, ce qui induit une plus grande hydratation initiale du ciment comparé aux autres mortiers. Contrairement au plus petit rapport E/C de chaque dosage, on constate une plus grande augmentation de la masse volumique due à la faible hydratation initiale du ciment par rapport aux autres mortiers.

Par ailleurs, on s'aperçoit que les mortiers les plus dosés en ciment ont des masses volumiques apparentes supérieures à celles des mortiers faiblement dosés. Ceci peut être attribué à la compacité du mortier où les grains de ciment vont combler les vides existants. De plus, on trouve une proportion importante de grains légers de sable recyclé dans les mortiers à faible concentration de ciment.

3.1.2.2 Effet du rapport E/C sur la masse volumique apparente

On va présenter respectivement la variation de la masse volumique apparente du mortier à 7 et 28 jours en fonction du rapport E/C pour les deux dosages en ciment dans les figures ci-après :

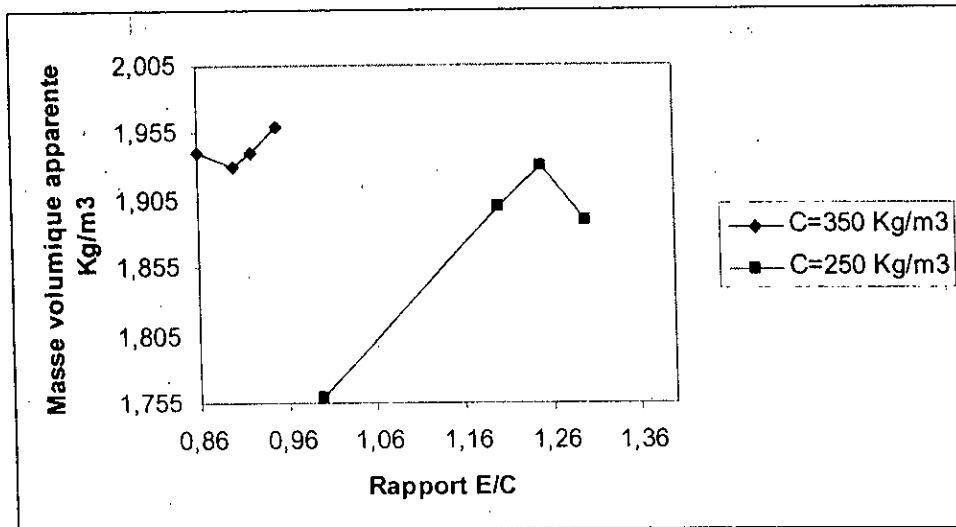


Figure 6.5 Masse volumiques apparentes à 7 j en fonction du rapport E/C et du dosage en ciment

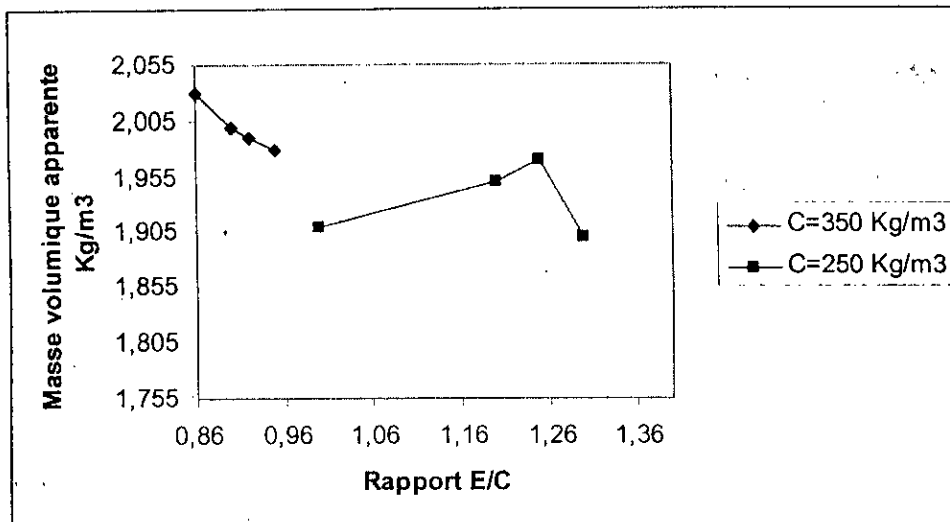


Figure 6.6 Masse volumiques apparentes à 28 j en fonction du rapport E/C et du dosage en ciment

La figure 6.6, montre deux formes de courbes de la masse volumique apparente à 28 jours, pour le dosage en ciment de 250 kg/m³ la courbe est sous forme d'une cloche, comme pour les courbes à 7 jours, ce qui nous laisse penser que ce dosage en ciment correspond à un mortier de ciment mal hydraté, car il est trop riches en sable à base de mortier de ciment concassé. Tandis que pour le dosage en ciment de 350 kg/m³, on remarque qu'à 28 jours un décroissement de forme hyperbolique (pente augmentant pour E/C élevés) sans obtenir de pic car le maximum est alors le point extrémité E/C=0.86, or à 7 jours on remarque une forme de cloche inversé avec un maximum de E/C=0.95. Cette analyse sera d'ailleurs confirmée lors de la présentation des résultats d'essais mécaniques.

3.1.3 Résistance à la compression

On va représenter dans le tableau qui va suivre les résultats des essais de compression

Dosage en ciment Kg/m ³	Notation	Rapport E/C	Résistance à la compression RC (MPa)	
			7 j	28 j
350	M _{A1}	0.86	15.56	24.90
	M _{A2}	0.90	14.90	23.00
	M _{A3}	0.92	15.50	19.19
	M _{A4}	0.95	14.57	19.90
250	M _{B1}	1	11.75	7.86
	M _{B2}	1.2	10	13.9
	M _{B3}	1.25	10.14	11.60
	M _{B4}	1.3	9.66	11.42

Tableau 6.11 Résistance a la compression

3.1.3.1 Accroissement de la résistance de la compression dans le temps

La figure 6.7 va représenter l'évolution de la résistance à la compression au cours du temps pour les deux dosages en ciment.

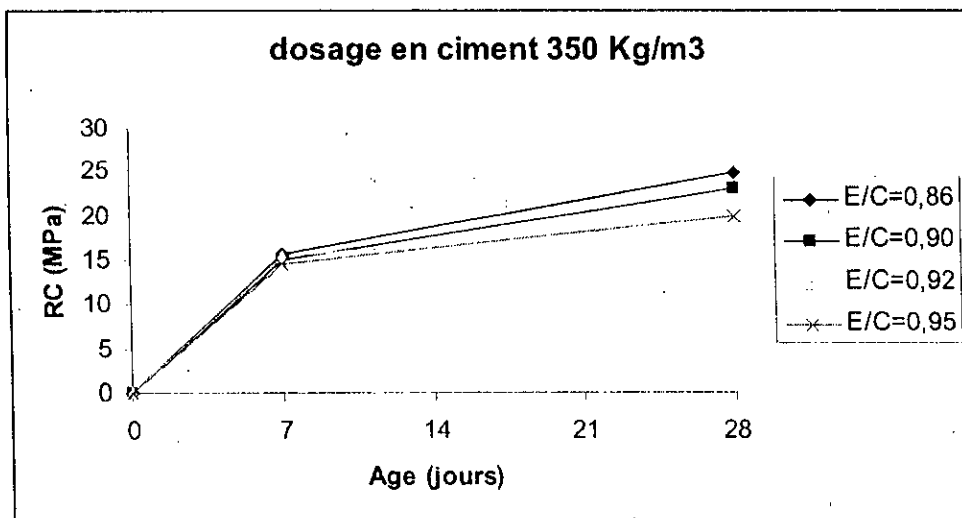


Figure 6.7 Evolution de la résistance a la compression pour chaque dosage en ciment

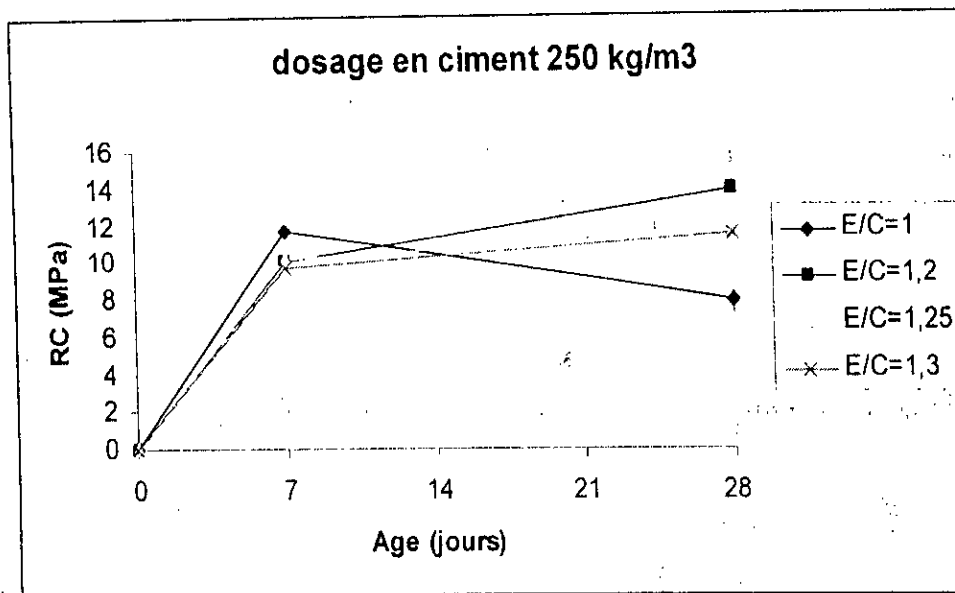


Figure 6.7 Evolution de la résistance a la compression pour chaque dosage en ciment

Les résultats obtenus ainsi que les graphes concernant l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les différents mortiers, nous permettent de déduire deux cas de figures. Dans un premier temps on constate que pour le dosage de 350 kg/m^3 , la résistance à la compression évolue régulièrement dans le temps tel que pour les rapport $E/C=0.86$ et $E/C=0.9$ son augmentation de 0 à 7 jours est presque égale à celle de 7 à 28 jours. Ceci pourrait s'expliquer par l'hydratation du ciment qui se fait lentement dans le temps, où cette hydratation est ralentie par la porosité du granulat recyclé.

Ceci implique que le durcissement continue plus ou moins au même rythme après 7 jours d'autant plus que les éprouvettes sont conservées dans l'eau, ce qui est valable aussi pour les deux autres rapports de E/C , sauf que leur augmentation de la résistance n'est pas aussi importante que celle des autres rapports, ceci est due à l'importante quantité d'eau de gâchage l'or de la confection des mortiers qui correspondent aux rapports $E/C=0.92$ et $E/C=0.95$, qui sont donc préhumidifiés par rapport aux deux autres.

Notre mortier est riche en sable recyclé et pauvre en ciment, donc il est plus hydrophile que le mortier du dosage précédent ce qui implique que l'hydratation du ciment est ralentie. Or on constate qu'il y a diminution de la résistance en compression RC_{28} à 28 jours, pour le rapport $E/C=1$ qui correspond d'ailleurs à un mortier très ferme. D'autre part on voit une augmentation significative de RC_{28} pour $E/C=1.2$ qui correspond à un mortier de très bonne maniabilité.

Néanmoins on peut déduire que la résistance des différents mortiers recyclés réalisés augmente avec l'âge des éprouvettes et de manière analogue que celle du mortier ordinaire. On conclut aussi que l'accroissement de la résistance diminue avec la diminution du dosage en ciment, chose confirmée par d'autres chercheurs notamment par Bedjou, qui a travaillé sur les déchets de briques [16]. Ces derniers ont aussi une forte porosité qui perturbe l'hydratation du ciment.

3.1.3.2 Etude de l'influence du rapport E/C sur la résistance à la compression

Les figures qui vont suivre illustrent respectivement la variation de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours en fonction du rapport E/C pour les deux dosages en ciment

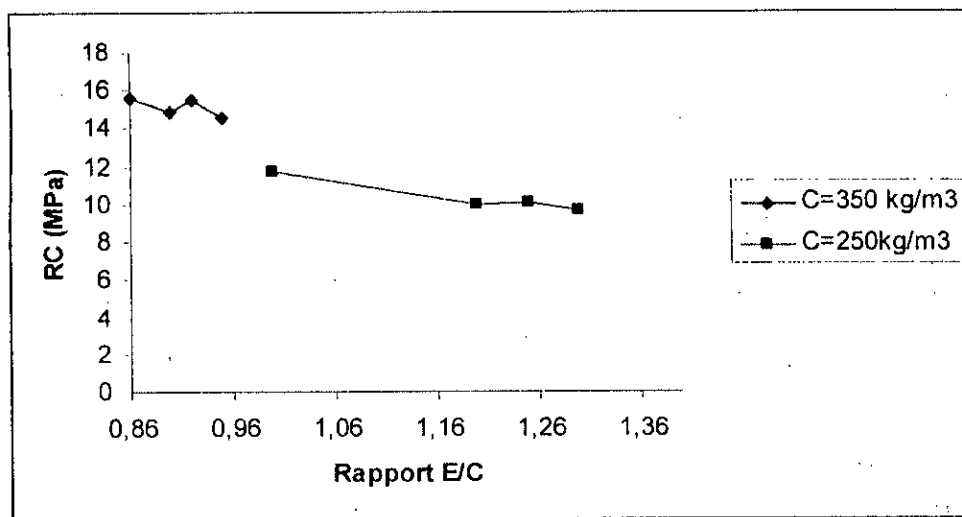


Figure 6.8 Résistance à la compression à 7 jours en fonction du rapport E/C pour chaque dosage en ciment

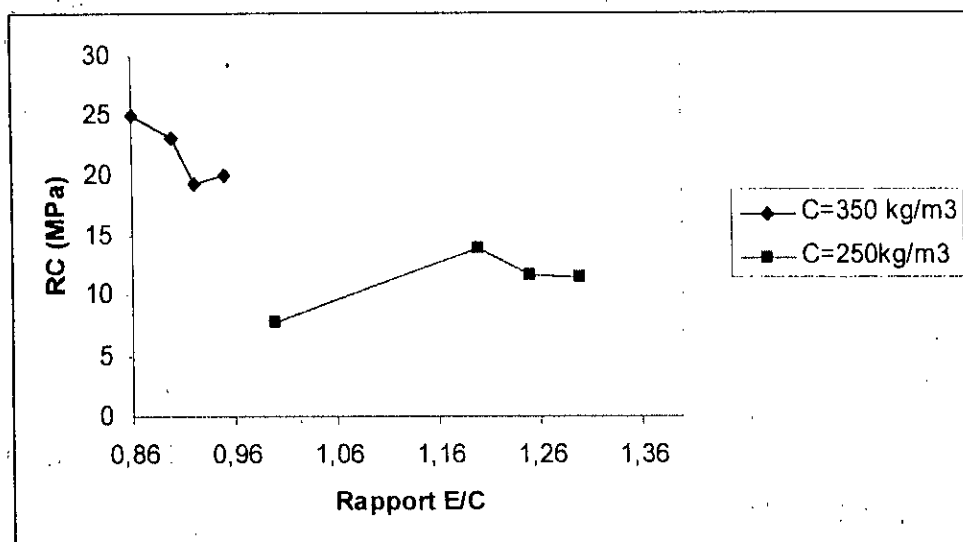


Figure 6.9 Résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport E/C pour chaque dosage en ciment

Les courbes de la variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport E/C présentent généralement une forme en cloche avec un maximum qui correspond au rapport E/C optimal. En effet pour le dosage 250 kg/m³, on remarque qu'à 28 jours la résistance du mortier de rapport E/C=1,2 a été importante alors qu'à 7 jours elle a été plutôt faible. Tandis que pour le dosage 350 kg/m³ à 7 jours l'optimum est atteint avec le rapport E/C=0,9 alors qu'à 28 jours ce n'est qu'avec E/C=0,86 que l'on a la meilleure résistance. Mais le rapport E/C=0,86 correspond à un mortier plus ou moins ferme, difficilement maniable.

On peut penser que la quantité d'eau importante demandée par le mortier à base de sable recyclé à cause de la porosité de ce sable perturbe l'hydratation aux échéances les plus précoces. Ceci pourrait expliquer la faiblesse de la résistance à la compression surtout à 7 jours. Toutefois, grâce à la conservation dans l'eau une compensation et même un rattrapage du retard dans le durcissement peuvent être enregistrés, en absorbant de l'eau en quantité relativement importante de 0 à 7 jours.

3.1.4 Résistance à la traction par flexion

Les résultats des essais de la résistance à la traction par flexion sont résumés dans le tableau 6.12.

Dosage en ciment Kg/m^3	Notation	Rapport E/C	Résistance à la traction par flexion RT	
			7 j	28 j
350	M _{A1}	0.86	4.5	6.06
	M _{A2}	0.90	4.64	5.60
	M _{A3}	0.92	4.50	5.41
	M _{A4}	0.95	4.56	4.98
250	M _{B1}	1	3.5	2.17
	M _{B2}	1.2	3.53	4.40
	M _{B3}	1.25	3.44	3.98
	M _{B4}	1.3	2.80	3.90

Tableau 6.12 Résistance à la traction par flexion

3.1.4.1 Evolution de la résistance à la traction par flexion au cours du temps

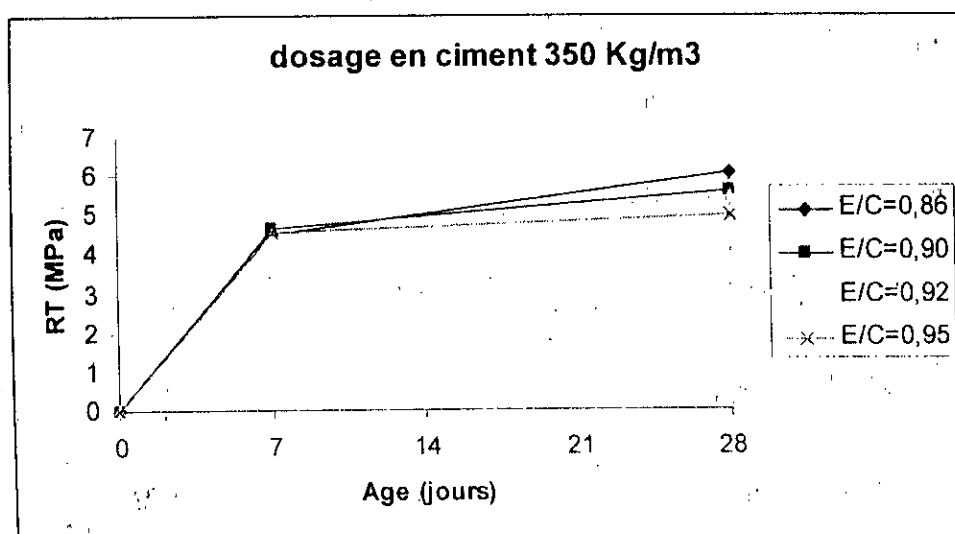


Figure 6.10 (a) Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour un dosage en ciment de 350 kg/m³

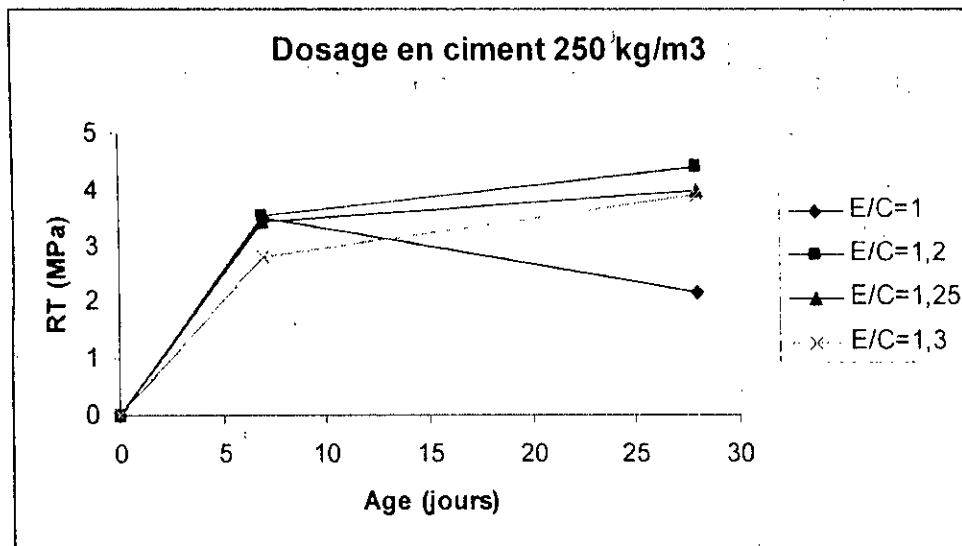


Figure 6.10 (b) Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour un dosage en ciment de 250 kg/m³

Les figures 6.10 (a), (b) illustre la variation de la résistance à la traction par flexion RT dans le temps pour chaque dosage en ciment. Les résultats sont pratiquement similaires à ceux obtenus en compression.

On voit ici que les résultats obtenus présentent les mêmes tendances que pour la compression. Ainsi à 250 kg/m³ ce sont les mortiers les plus riches en eau qui donnent les meilleures résistances. Tandis qu'à 350 kg/m³ c'est le rapport 0,86 qui donne les meilleures résistances.

D'après les résultats trouvés, on constate que RT évolue de la même façon que la résistance à la compression. Ainsi pour les dosages en ciment 350 kg/m³, et 250 kg/m³, le durcissement du mortier se fait régulièrement dans le temps avec une vitesse de 0 à 7 jours plus importante que celle de 7 à 28 jours quelque soit le dosage en eau où la résistance à la traction par flexion croît régulièrement dans le temps.

Ces phénomènes peuvent s'expliquer de la même manière que pour la compression du fait de la porosité des grains du sable recyclé qui ont tendance à ralentir l'hydratation du ciment en lui absorbant l'eau nécessaire à son hydratation.

On peut en conclure que la résistance à la traction décroît en fonction du pourcentage du sable recyclé intervenant dans la composition du mortier et chute d'environ 9.15 % pour le dosage 350 kg/m³ et d'environ 30 % pour l'autre dosage, et ceci est toujours dû au manque d'hydratation du ciment. D'autre part, on constate que le taux d'accroissement de RT, est toujours aussi important même après 7 jours pour les deux dosages en ciment, et que plus le dosage en ciment est élevé plus la résistance est importante. De ce point de vue là, cela est analogue aux mortiers ordinaires à base de granulats naturels.

De plus, lors de l'essai de traction par flexion les éprouvettes prismatiques du mortier à base de mortier recyclé ont eu une rupture verticale ce qui correspond du point de vue mécanique au premier mode de rupture comme le montrent la figure 6.11 ci-après



Figure 6.11 Vue de l'état de rupture d'un prisme de mortier à base de granulat recyclé

3.1.4.2 Influence du rapport E/C sur la résistance à la traction par flexion

Les figures ci-après, présentent la variation respectivement de la résistance à la traction par flexion (RT) à 7 jours et à 28 jours en fonction du rapport E/C.

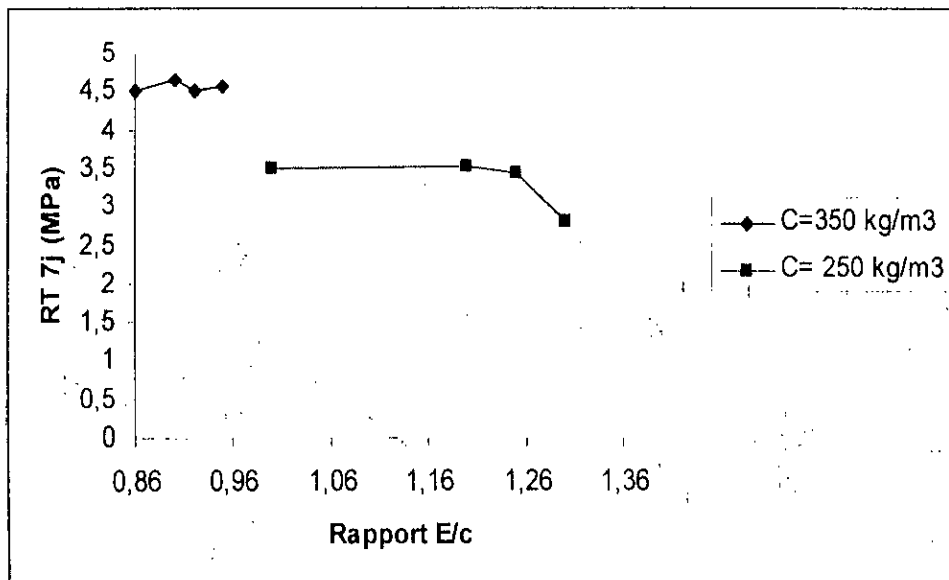


Figure 6.12 Variation des résistances à la traction par flexion à 7j en fonction de E/C

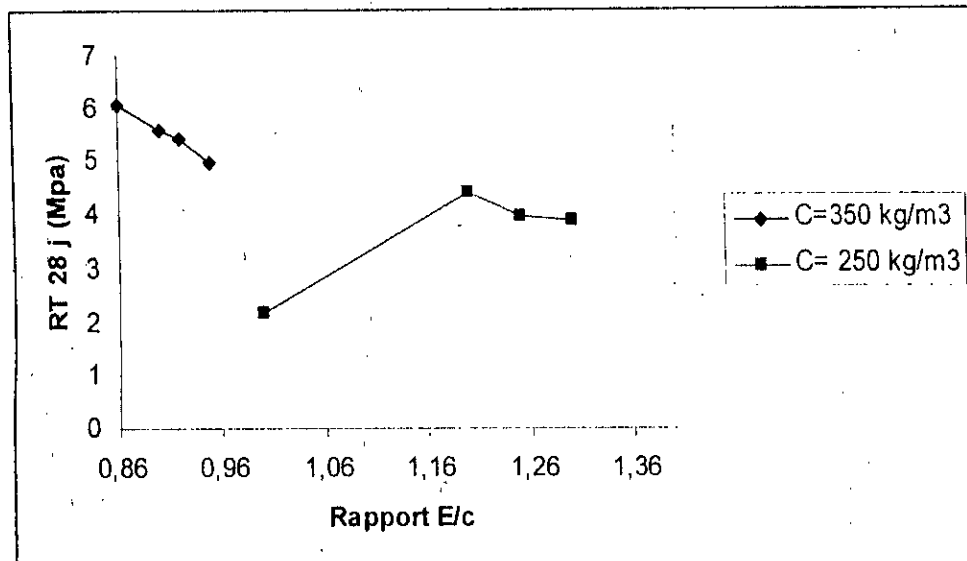


Figure 6.13 Variation des résistances à la traction par flexion à 28 j en fonction de E/C

En peut déduire de ces graphes représentées dans la figure 6.13 qui donnent la variation de la résistance en flexion à 28 jours en fonction du rapport E/C, qu'il présente pour le dosage 350 kg/m³ une forme d'une droite décroissante qui a comme maximum son extrémité E/C=0.86. Tandis que pour le dosage 250 kg/m³ elle présente une forme en cloche avec un maximum qui correspond au rapport E/C optimal. Ceci est plus ou moins similaire à ce que l'on a vu pour les essais de compression. Les mêmes commentaires quant à l'influence de la porosité sur l'hydratation restent valables.

3.1.5 Rapport entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente

Des résultats recensés dans les tableaux 6.10 et 6.11, on note clairement une relation très importante entre la résistance à la compression et la masse volumique apparente. Tel qu'on s'aperçoit que plus les masses volumiques apparentes des mélanges sont faibles, plus il y a lieu d'un ralentissement de l'évolution à la compression à 28 jours, et sont ceux qui se situent entre 1.9 et 1.91 t/m³. D'autre part, les mortiers les plus résistants sont généralement les plus lourds c'est-à-dire les plus denses, qui à 28 jours leurs masses volumiques apparentes se situent entre 1.98 et 2.06 t/m³. Ceci s'explique certainement comme nous l'avons déjà expliqué précédemment, par le fait qu'ils sont mieux hydratés donc moins poreux, grâce à un dosage en eau et en ciment optimal d'où une masse volumique plus élevée.

3.1.6 Etude du retrait

Afin d'étudier les déformations par retrait des différents mortiers préparés à base de sable, naturel et recyclé le tableau 7.13 regroupe les valeurs de retrait obtenues en air sec (20°C ; 56% HR) en µm/m. On a choisi de porter notre étude du retrait pour les mortiers à base de sable recyclé qui ont un rapport de E/C=0,90 pour le dosage de 350 kg/m³, et E/C=1,2 pour 250 kg/m³, vu leur bonne maniabilité.

Notation	Retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
	3j	7j	14j	28j
M _{0,90}	520.24	585.52	648.12	761.09
M _{1,2}	578.14	649.02	751.66	842.72
M _{SN}	485.17	572.20	620.30	744.56

Tableau 6.13 Retraits obtenus à différents âges

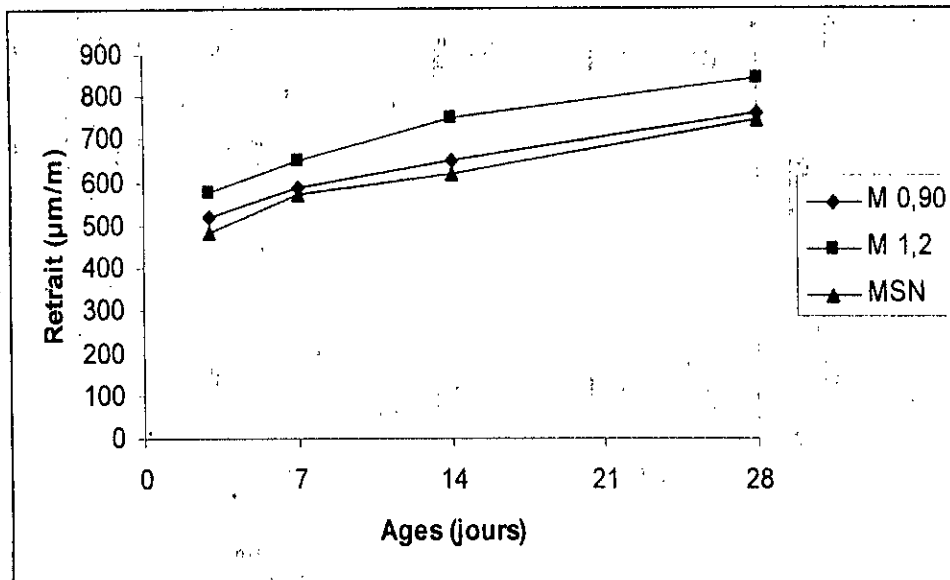


Figure 6.14 (a) Evolution du retrait à travers le temps

La figure 6.14 (a) montre que le retrait en air sec du mortier à base de sable issu du concassage du mortier de ciment est nettement plus important que celui du mortier à base de sable naturel d'environ 2% pour M_{0,90} (dosage en ciment 350kg/m³) et 13% pour M_{1,2} (dosage en ciment 250kg/m³) aussi bien à 7 qu'à 28 jours.

On note dans ce cas, que plus la proportion de sable recyclé augmente et plus le retrait augmente. Ceci est dû d'une part au fait que le sable recyclé a été introduit sec dans le mélange et d'autre part à la forte absorption d'eau du sable recyclé à cause de sa porosité qui est d'environ 5 fois supérieure à celle du sable naturel.

Par conséquent, la succion capillaire initiale exercée par les grains du sable recyclé étant plus importante, le retrait qui suit cette dernière est logiquement plus grand : l'eau absorbée par les granulats au début du malaxage s'élimine au cours de la prise et du durcissement des mortiers. Ces résultats sont confirmés par d'autres chercheurs, notamment par Bedjou citée auparavant, ainsi que par Coquillat [36] qui a travaillé sur les béton recyclés et qui a constaté une augmentation d'environ 80 % du retrait par rapport au naturel.

Pour une éventuelle diminution du retrait on peut suggérer l'ajout d'un adjuvant plastifiant, ce qui permettrait une diminution du rapport E/C et donc de la consommation d'eau.

3.1.7 Capacité d'absorption d'eau

Notation	Absorption d'eau par capillarité en (g)								
	10mn	20mn	30mn	40mn	50mn	60mn	70mn	80mn	90mn
M _{0,90}	15.32	19.40	22.13	25.67	27.04	28.41	29.53	29.98	30.10
M _{1,2}	17.87	21.81	24.87	27.23	29.10	30.56	31.73	31.89	32
M _{SN}	8.07	9.12	10.03	11.73	11.96	12.40	12.75	13.28	13.37

Tableau 6.14 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité au cours du temps

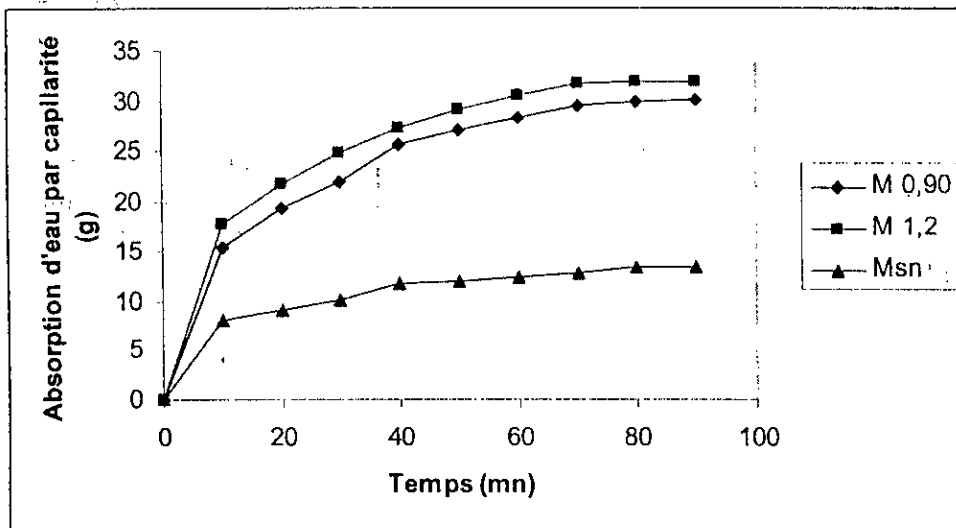


Figure 6.14 (b) Evolution de l'absorption d'eau par capillarité des mortiers

D'après les résultats trouvés, on constate que le sable issu du concassage du mortier de ciment absorbe beaucoup d'eau. Ceci est du généralement à la présence de la matrice de ciment d'ancien mortier collé aux granulats recyclés, en plus de la grosseur et la forme angulaire des grains de ce sable qui permettent la formation des pores. En fait, on peut dire que plus la proportion du sable recyclé augmente, plus la succion d'eau par capillarité augmente, comme l'indique le graphe de la fig 6.14 (b). Ceci peut s'expliquer par la grande capacité d'absorption d'eau du sable recyclé.

On en déduit donc que l'absorption d'eau par capillarité est directement liée à la porosité du mortier. Un mortier à base de sable naturel est plus compact, moins poreux et par conséquent plus étanche à l'eau.

En résumé, on peut dire que l'introduction d'un sable recyclé dans la composition d'un mortier, provoque une diminution de sa densité, accompagnée d'une augmentation de la porosité et de la perméabilité entraînant des conséquences l'absorption d'eau et sur le retrait du mortier.

3.2 Sable recyclé à base de terre cuite, plâtre et mortier de ciment, et sable à base de sable naturel et plâtre recyclé

On notera que pour le sable recyclé à base de terre cuite+plâtre+mortier de ciment, issu du concassage d'un mur de maçonnerie extérieur à double cloison, on a calculé la proportion de chaque constituant dans 1 m² de mur, afin de prendre la même quantité de plâtre trouvée et de la mélanger avec du sable naturel pour obtenir un nouveau sable. Ceci en vue de faire une étude comparative entre ces deux sables. Les proportions trouvées sont :

- ✓ 79% pour la brique en terre cuite
- ✓ 11% pour le mortier de ciment
- ✓ 10% pour le plâtre

Ainsi nous avons envisagé un sable S_{RB} issu d'un mélange correspondant à ces proportions et un autre sable S_{NP} où les concassés de mortier de ciment et de brique sont remplacés par du sable naturel afin d'isoler les effets du plâtre. Dans les deux cas les mortiers préparés sont dosés uniquement à 350 kg/m³.

3.2.1 Etude de la maniabilité du mortier frais

Pour les deux types de mortier, les résultats obtenus de l'essai de maniabilité, sont incohérents car en présence du plâtre recyclé, même en proportion modérée de 10%, la pâte obtenue commence à durcir très rapidement.

Pour avoir des résultats plus corrects, il faudrait peut être ajouter un retardateur de prise (sulfate de soude, borax, phosphate de soude...etc.) [23].

3.2.2 La masse volumique apparente

Des mesures de masse volumique apparente ont été réalisées au démoulage à 24 h et pour chaque âge correspondant aux échéances d'écrasement des éprouvettes du mortier. Les valeurs moyennes des masses volumiques pour les différents mortiers envisagés sont mentionnées dans le tableau 6.15.

Dosage en ciment Kg/m ³	Notation	Rapport E/C	Masse volumique apparente (t/m ³)	
			7 j	28 j
350 (S _{RB})	M _{A1}	1.2	1.84	1.86
	M _{A2}	1.3	1.90	1.94
	M _{A3}	1.35	1.87	1.91
	M _{A4}	1.4	1.85	1.89
350 (S _{NP})	M _{B1}	0.90	1.98	2.08
	M _{B2}	0.92	2	2.21
	M _{B3}	0.95	2.10	2.12
	M _{B4}	1	2.07	2.09

Tableau 6.15 Masses volumiques apparentes des mortiers de sable recyclé

3.2.2.1 Evolution de la masse volumique apparente dans le temps

La figure ci-après illustre l'évolution des masses volumiques apparentes pour les deux dosages en ciment et pour différents ages

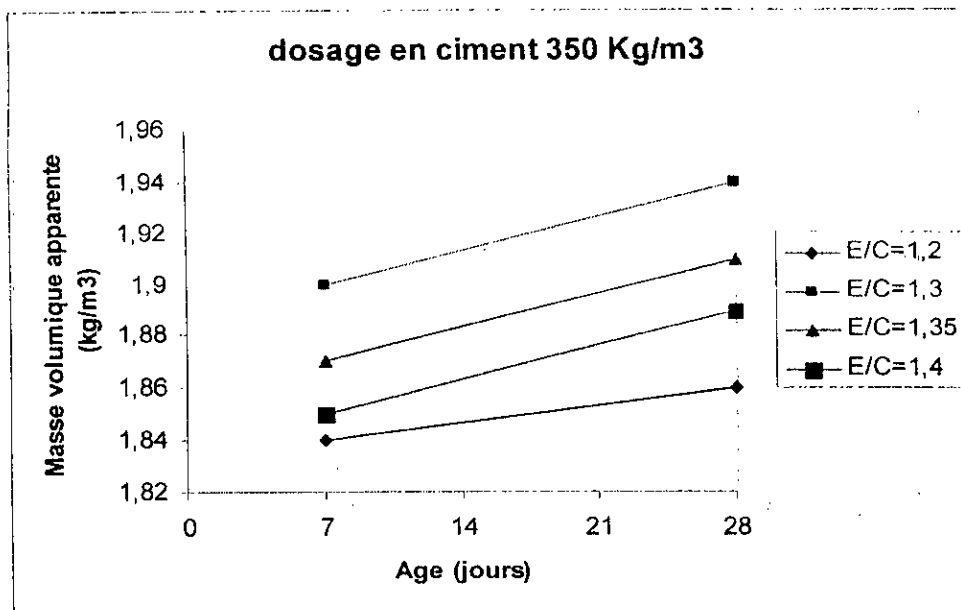


Figure 6.15 Evolution de la masse volumique apparente des mortiers à base de sable S_{RB} issu du concassage d'un mur de maçonnerie (brique+plâtre+mortier ciment) en fonction du temps

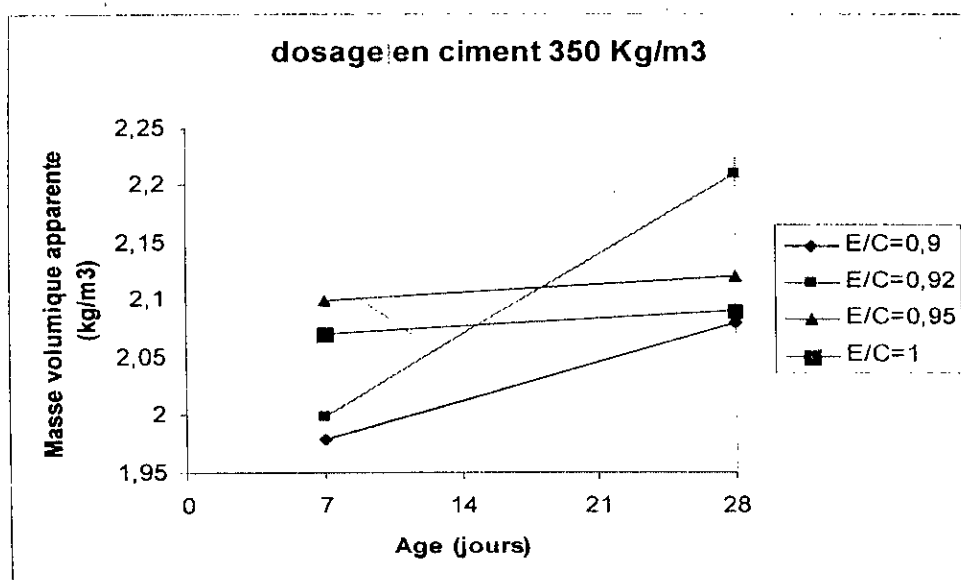


Figure 6.16 Evolution de la masse volumique apparente en fonction du temps des mortiers à base de sable S_{NP} constitué de Sable naturel + 10%plâtre recyclé

Selon les résultats obtenus on constate dans un premier temps que les masses volumiques du mortier à base de S_{RB} sont plus petites que celles d'un mortier ordinaire. C'est le même cas de figure pour le sable étudié précédemment. On peut l'expliquer également par la porosité qu'a hérité le mortier du nouveau sable le constituant, qui ralentit quelque peu l'hydratation du ciment aux âges les plus précoces. Contrairement au mortier à base de S_{NP} , où sa masse volumique est similaire, voire supérieure à celle du mortier ordinaire, cela peut s'expliquer par le faible pourcentage du plâtre dans ce sable qui n'a pas une grande influence sur le poids, mais qui rend le mortier beaucoup plus absorbant à l'eau que celui avec un sable naturel ($0.9 \leq E/C \leq 1$). D'une manière générale, les mortiers ont des masses volumiques qui augmentent légèrement dans le temps.

On remarque pour les mortiers à base de S_{NP} , que les masses volumiques des mortiers dans les deux plus grands rapports E/C augmentent plus rapidement que les deux autres. Ceci est dû au fait que la quantité d'eau de gâchage mise pour la confection des mortiers correspondant aux deux plus grands rapports est faible par rapport aux deux autres. Ce qui induit une plus faible hydratation initiale du ciment par rapport aux autres mortiers.

Par contre pour les mortiers à base de S_{RB} , l'évolution de la masse volumique se fait de la même manière pour tous les rapports bien qu'ils soient différents.

3.2.2.2 Effet du rapport E/C sur la masse volumique apparente

On va présenter respectivement la variation de la masse volumique apparente du mortier à 7 et 28 jours en fonction du rapport E/C pour les deux dosages en ciment dans les figures ci-après :

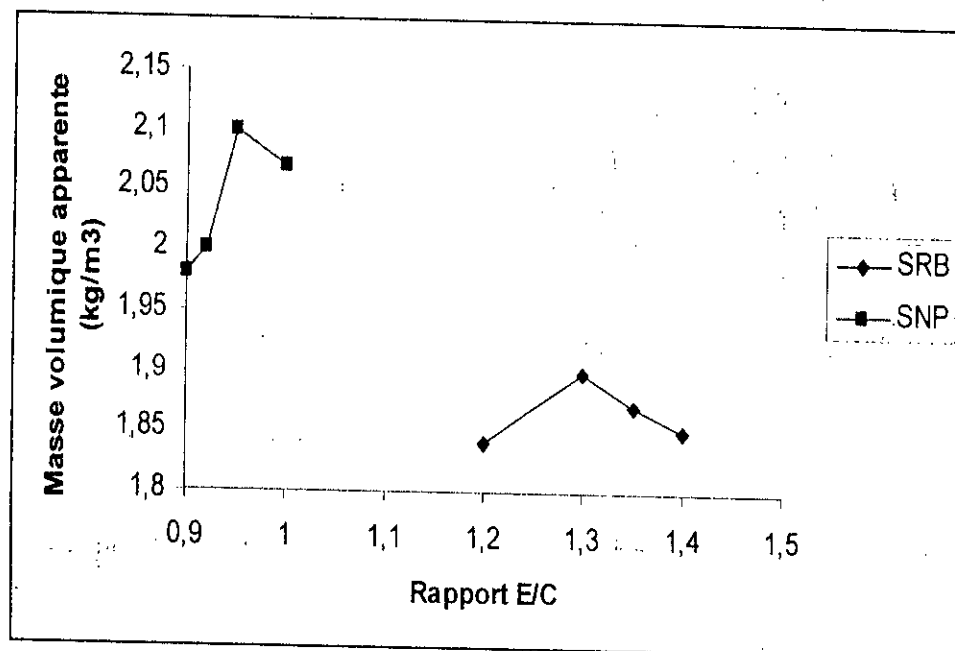


Figure 6.17 Masse volumiques apparentes à 7 j en fonction du rapport E/C pour les mortiers avec S_{RB} et S_{NP}

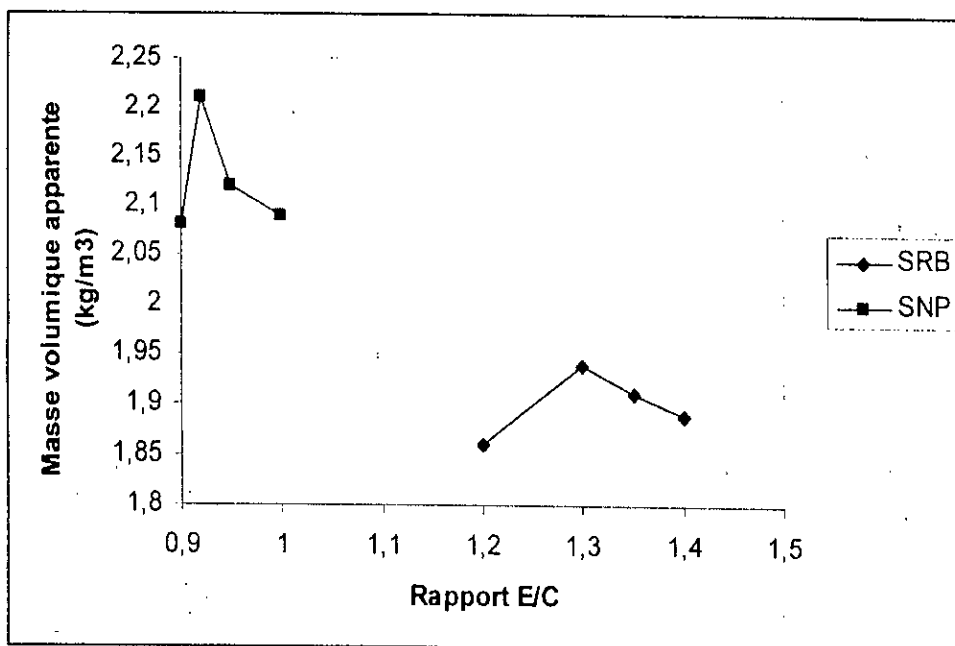


Figure 6.18 Masse volumiques apparentes à 28 j en fonction du rapport E/C pour les mortiers à base de sable S_{RB} et S_{NP}

On constate que les courbes obtenues à 28 jours définissent une forme de cloche comme pour les courbes à 7 jours. Ce qui nous laisse penser tout comme le premier mortier étudié que ce dosage en ciment correspond à un mortier de ciment où l'hydratation pourrait être perturbée. Car la présence de plâtre pour S_{NP} et de plâtre, terre cuite et mortier pour S_{RB} entraîne une succion d'eau par leur porosité. Ceci explique les rapports E/C très élevés atteints avec S_{RB} ($1.2 \leq E/C \leq 1.4$).

3.2.3 Résistance à la compression

Dosage en ciment Kg/m ³	Notation	Rapport E/C	Résistance à la compression (MPa)	
			7 j	28 j
350 (S_{RB})	M_{A1}	1.2	6.68	6.46
	M_{A2}	1.3	5.34	9.20
	M_{A3}	1.35	5.12	8.76
	M_{A4}	1.4	4.26	6.80
350 (S_{NP})	M_{B1}	0.90	6.21	9.34
	M_{B2}	0.92	7.14	11.31
	M_{B3}	0.95	5.72	8.2
	M_{B4}	1	4.43	6.56

Tableau 6.16 Résistance à la compression

3.2.3.1 Accroissement de la résistance de la compression dans le temps

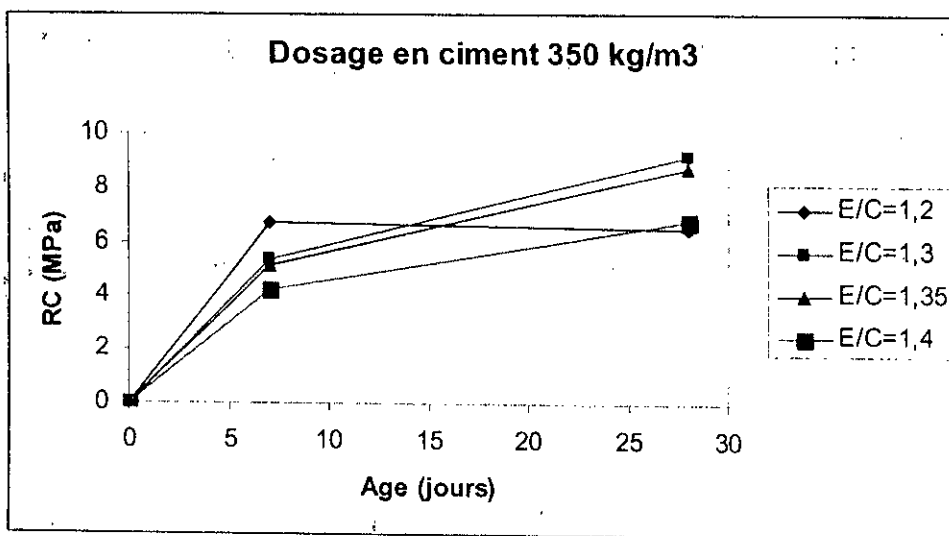


Figure 6.19 (a) Evolution de la résistance à la compression avec mortier au sable S_{RB}

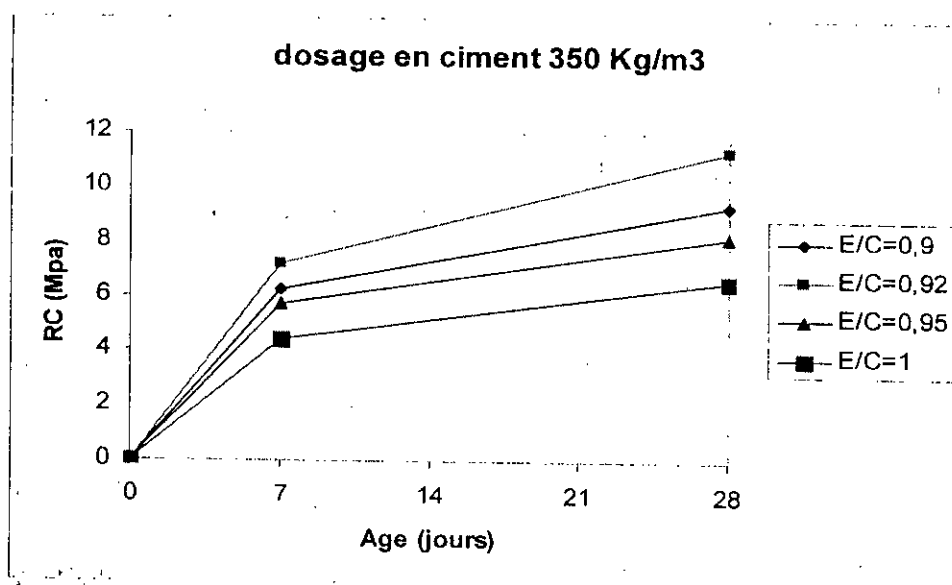


Figure 6.19 (b) Evolution de la résistance a la compression pour le mortier au sable S_{NP}

L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les différents mortiers, nous permet de déduire que la résistance à la compression évolue régulièrement dans le temps, et de manière assez importante même après 7 jours. Ceci pourrait s'expliquer comme pour le mortier étudié précédemment, par la perturbation de l'hydratation du ciment qui se fait lentement dans le temps à cause de la succion d'eau du fait de la porosité du granulat recyclé. Ce qui implique que le durcissement continu avec un rythme important après 7 jours car les éprouvettes sont conservées dans l'eau.

Mais néanmoins on remarque que les résistances à la compression sont assez faibles à 7 et à 28 jours, ce qui est du à la présence du plâtre dans le mélange. Ce dernier en plus de son incompatibilité avec le ciment [], a la capacité d'absorber énormément d'eau ce qui ralentit l'hydratation du ciment malgré le dosage de 350 kg/m^3 . D'ailleurs on constate que pour le

mortier à base de S_{RB} il y a eu une baisse de la résistance du mortier de rapport $E/C = 1,2$, c'est le même cas de figure pour le mortier recyclé à faible dosage vu précédemment, ce qui nous laisse penser qu'on pourrait avoir une meilleur résistance en augmentant le dosage en ciment ou en ajoutant un superplastifiant.

3.3.3.2 Etude de l'influence du rapport E/C sur la résistance a la compression

Les figures qui vont suivre illustrent respectivement la variation de la résistance à la compression à 7 jours et à 28 jours en fonction du rapport E/C pour les deux dosages en ciment

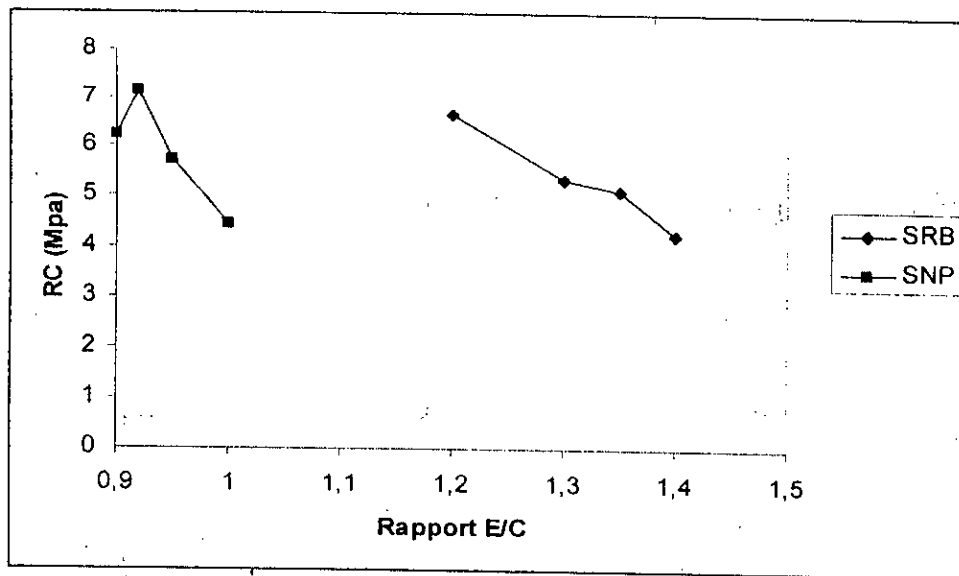


Figure 6.20 (a) Résistance à la compression à 7 jours en fonction du rapport E/C pour chaque sable

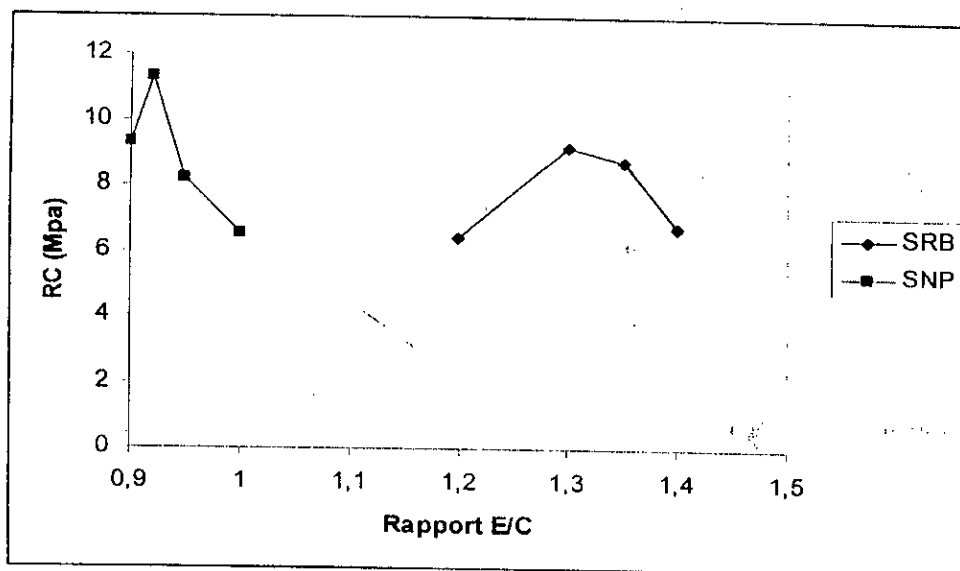


Figure 6.20 (b) Résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport E/C pour chaque sable

Les courbes obtenues présentent généralement une forme en cloche avec un maximum qui correspond au rapport E/C optimal. En effet pour le mortier à base de S_{RB} on remarque qu'à 28 jours la résistance du mortier augmente plus ou moins de la même manière pour tous les rapports. Contrairement au mortier à base de S_{NP} où on constate une importante augmentation de la résistance du mortier du rapport E/C = 1.3, alors qu'à 7 jours elle a été plutôt faible.

On peut penser là aussi que la quantité d'eau importante demandé d'une part par le mortier à base de S_{NP} , qui est due principalement à la présence du plâtre bien qu'il soit recyclé, et d'autre part par le mortier à base de S_{RB} , qui en plus du plâtre se trouve les déchets de terre cuite qui absorbent à leurs tour beaucoup d'eau, ce qui explique les rapports E/C très élevés de ce dernier mortier. La porosité de ces sables perturbe l'hydratation du ciment, ce qui engendre une chute de la résistance à la compression.

3.2.4 Résistance à la traction par flexion

Dosage en ciment Kg/m ³	Notation	Rapport E/C	Résistance à la traction par flexion RT (MPa)	
			7 j	28 j
350 (S_{RB})	M_{A1}	1.2	1.66	1.81
	M_{A2}	1.3	1.78	2.81
	M_{A3}	1.35	1.74	2.76
	M_{A4}	1.4	1.46	1.76
350 (S_{NP})	M_{B1}	0.90	1.97	2.6
	M_{B2}	0.92	2.15	2.98
	M_{B3}	0.95	1.87	2.23
	M_{B4}	1	1.41	2.05

Tableau 6.17 Résistance à la traction par flexion

3.2.4.1 Evolution de la résistance à la traction par flexion au cours du temps

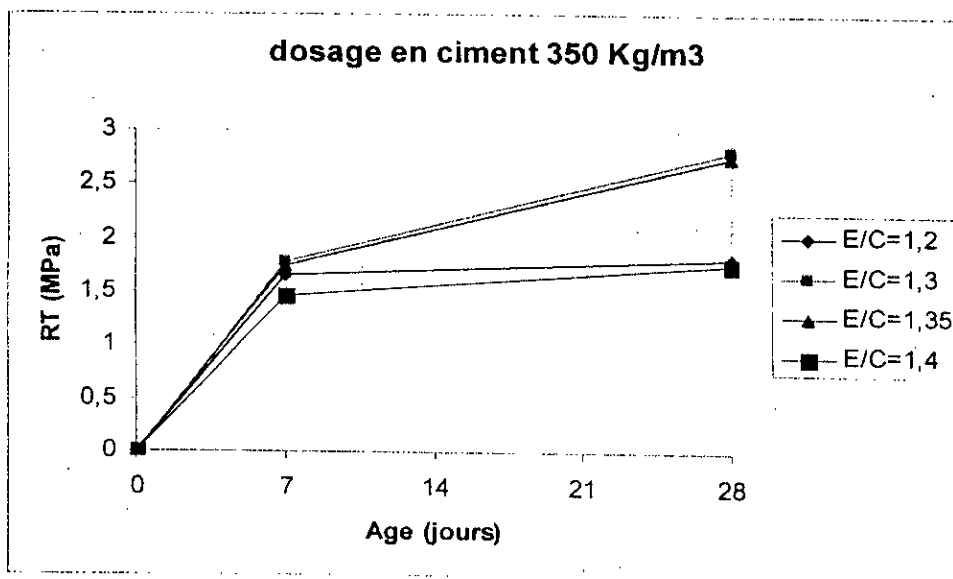


Figure 6.21 Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour le sable S_{RB}

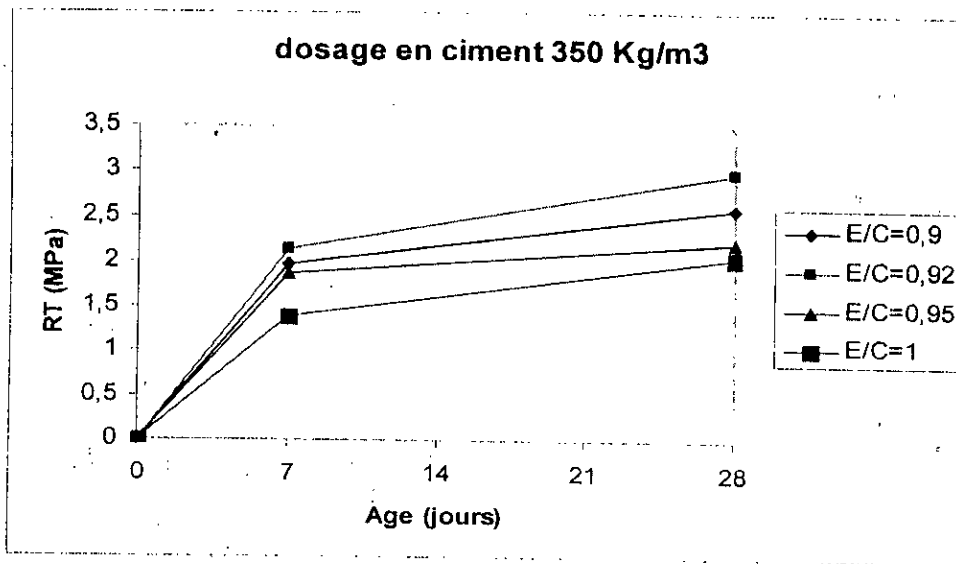


Figure 6.22 Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour le sable S_{NP}

Pour les mortiers à base de S_{RB} tout comme la compression, la résistance à la traction a augmenté régulièrement dans le temps. On remarque que son taux d'évolution est assez importante même après 7 jours, surtout pour les rapports $E/C = 1,3$ et $E/C = 1,35$. Pour les deux autres rapports l'évolution se fait plus lentement, c'est du au fait que le mortier de rapport $E/C = 1,2$ est très ferme, et d'autre part pour le rapport $E/C = 1,4$ le mortier à une importante hydratation initiale.

Pour les mortiers à base de S_{NP} l'évolution de la résistance à la traction se fait plus ou moins de la même manière pour tous les rapports.

Ces phénomènes peuvent s'expliquer de la même manière que pour la compression du fait de la porosité des grains du sable recyclé qui ont tendance à ralentir l'hydratation du ciment en lui absorbant l'eau nécessaire à son hydratation.

On peut dire là aussi que la résistance à la traction décroît en fonction du pourcentage du sable recyclé intervenant dans la composition du mortier, surtout que nos deux sables contiennent du plâtre, et chute d'environ 62,8 % pour le mortier à base de S_{RB} , et d'environ 59.9 % pour le mortier à base de S_{NP} , et ceci est toujours dû au manque d'hydratation du ciment. Cette petite analyse nous permet néanmoins de déduire que la chute de la résistance à la traction est due essentiellement au plâtre qui se trouve dans les sables étudiés qui absorbe à lui seul une importante quantité d'eau. Ceci nous permet de prédire qu'un mortier sans plâtre avec comme constituant uniquement du sable à base de terre cuite+mortier de ciment concassés pourrait donner de bonnes résistances aussi bien à la traction qu'à la compression.

3.2.4.2 Influence du rapport E/C sur la résistance à la traction par flexion

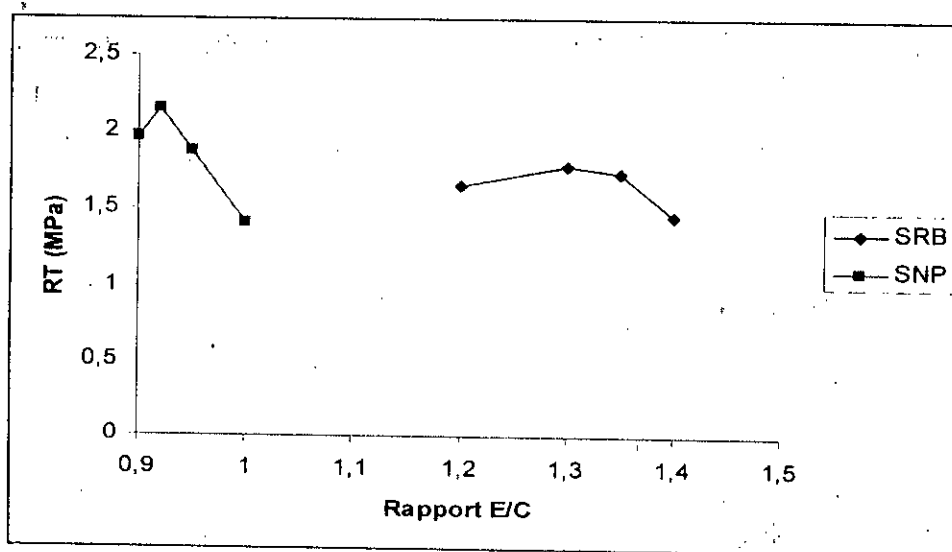


Figure 6.23 Variation des résistances à la traction par flexion à 7j en fonction de E/C

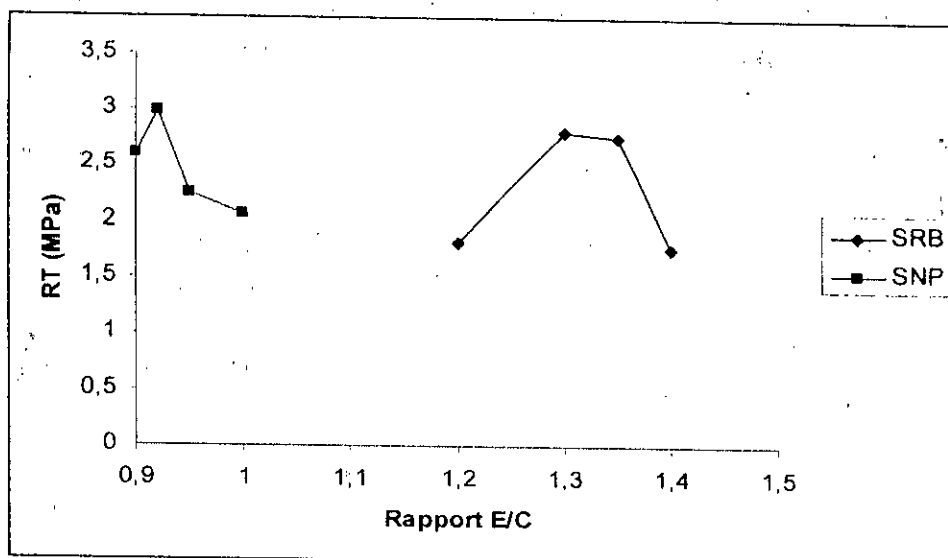


Figure 6.24 Variation des résistances à la traction par flexion à 28 j en fonction de E/C

On remarque que la forme des courbes à 28 jours sont pratiquement similaires à celles de 7 jours. Car on constate généralement qu'à 28 jours les courbes ont une forme en cloche qui ont comme un maximum la valeur du rapport E/C optimal. Ceci est plus ou moins similaire à ce que l'on a vu pour les essais de compressions. Les mêmes commentaires quant à l'influence de la porosité sur l'hydratation restent valables.

3.2.5 Etude du retrait

Notation	Retrait ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
	3j	7j	14j	28j
$M_{1,3}$ (SRB)	620.62	710.44	680.76	676.23
$M_{0,92}$ (SNP)	495.32	585.17	640.12	780.44
M_{SN}	485.17	572.20	620.30	744.56

Tableau 6.18 Retraits obtenus à différents âges

On voit de la figure 6.18 qui vient ci-après que le retrait à 28 jours du mortier à base de S_{NP} est légèrement supérieur à celui du mortier à base de sable naturel, c'est est dû au plâtre dans ce sable. A contrario pour le mortier à base de S_{RB} où le taux d'accroissement du retrait de 3 à 7 jours de $M_{0,92}$ est inférieur de celui du mortier naturel on peut constater que le retrait diminue au-delà de 7 jours. Il est très probable qu'il y ait eu un gonflement à partir du 7^{ème} jours. Ceci pourrait s'expliquer du fait que la terre cuite et mortier concassé présent dans ce sable absorbent beaucoup d'eau. Il va y avoir une certaine humidité qui, avec le plâtre va favoriser la formation de sels gonflants (voir chapitre 3).

On peut confirmer l'analyse précédente par quelques chiffres. Car on a enregistré un accroissement d'environ :

- ✓ 2 % à 7 jours et de 5 % à 28 jours pour le mortier à base de S_{NP} ;
- ✓ 19 % à 7 jours pour le mortier à base de S_{RB} , puis un décroissement de 9 % à 28 jours

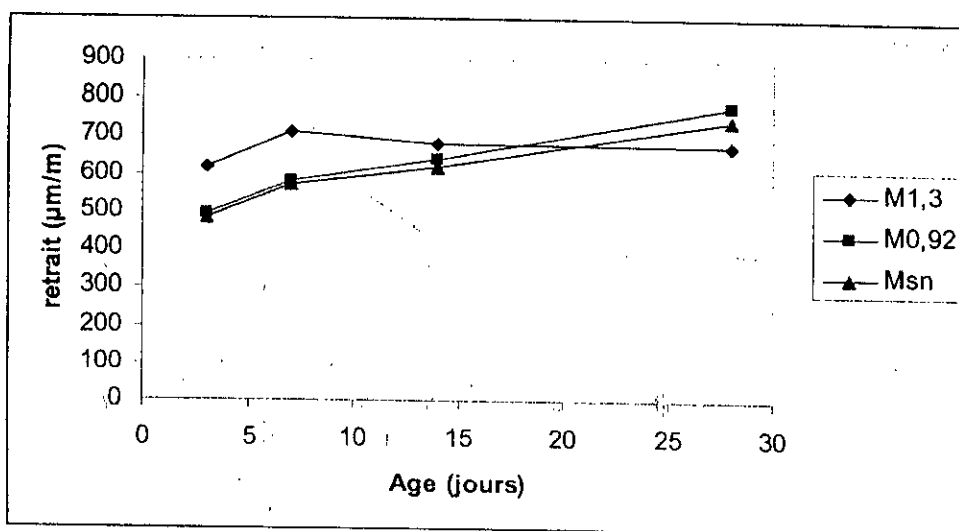


Figure 6.25 Evolution du retrait à travers le temps

3.2.6 Capacité d'absorption d'eau

Notation	Absorption d'eau par capillarité en grammes								
	10mn	20mn	30mn	40mn	50mn	60mn	70mn	80mn	90mn
M _{1,30}	22.63	23.71	24.36	25.19	25.65	26.14	26.60	26.70	27.10
M _{0,92}	10.41	12.05	13.14	13.97	14.69	15.27	15.80	16.22	16.40
M _{SN}	8.07	9.12	10.03	11.73	11.96	12.40	12.75	13.28	13.37

Tableau 6.19 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité au cours du temps

D'après les résultats trouvés et le graphe ci-après, on constate que le mortier à base de S_{RB} absorbe beaucoup plus d'eau que le mortier à base de S_{NP}. Ceci est dû à S_{RB} qui contient des granulats recyclés en plus du plâtre qui ont une énorme capacité d'absorption, en plus de la grosseur et la forme angulaire des grains de ce sable qui permettent la formation des pores. En fait, on peut dire que plus la proportion du sable recyclé augmente, plus la succion d'eau par capillarité augmente.

Le mortier à base de S_{NP} est à son tour plus absorbant que le mortier naturel, en raison de la présence d'une certaine quantité de plâtre dans ce sable

On en déduit donc que l'absorption d'eau par capillarité est directement liée à la porosité du mortier. Un mortier à base de sable naturel est plus compact, moins poreux et par conséquent plus étanche à l'eau.

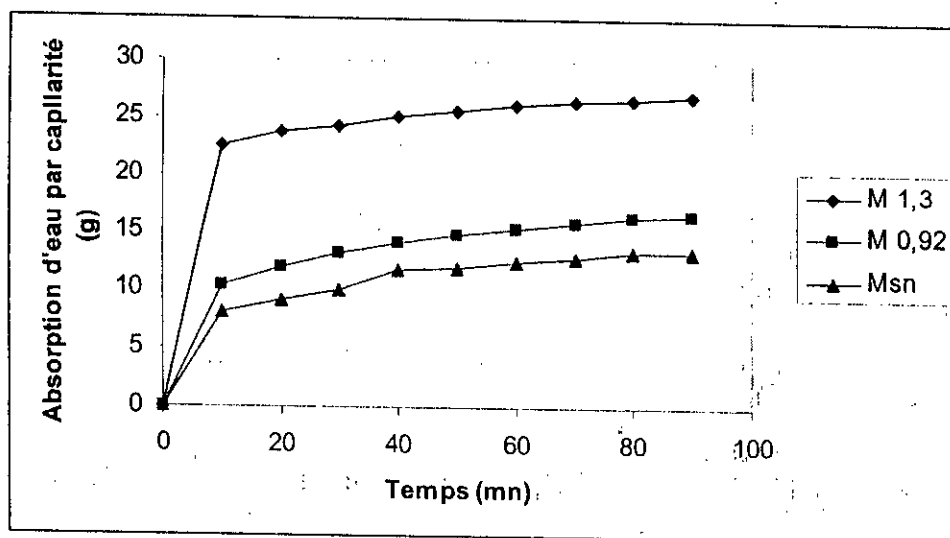


Figure 6.26 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité des mortiers

CONCLUSION

CONCLUSION

En conclusion, et d'après les résultats obtenus de cette étude on peut dire que :

- a. Les rapports E/C, pour le mortier à base de mortier de ciment concassé sont très élevés par rapport au mortier ordinaire, cela est dû à la grande porosité du sable recyclé. On constate aussi que le besoin en eau du mélange à base de sable recyclé est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est faible. Néanmoins le mortier à base de ce sable donne de très bons résultats vis-à-vis la résistance à la compression ainsi qu'à la traction.
- b. Pour le mortier à base de « 10% plâtre+79% brique+11% mortier de ciment » et « 10% plâtre+90% sable naturel », les rapports E/C sont encore plus élevés que ceux du mortier à base de mortier de ciment concassé, même à un dosage de 350 kg/m³, c'est dû à la très grande porosité de ces sables à cause de la présence du plâtre. Les résistances à la compression et à la traction restent très faibles même après 28 jours.

Pour de meilleurs résultats on peut faire les suggestions suivantes :

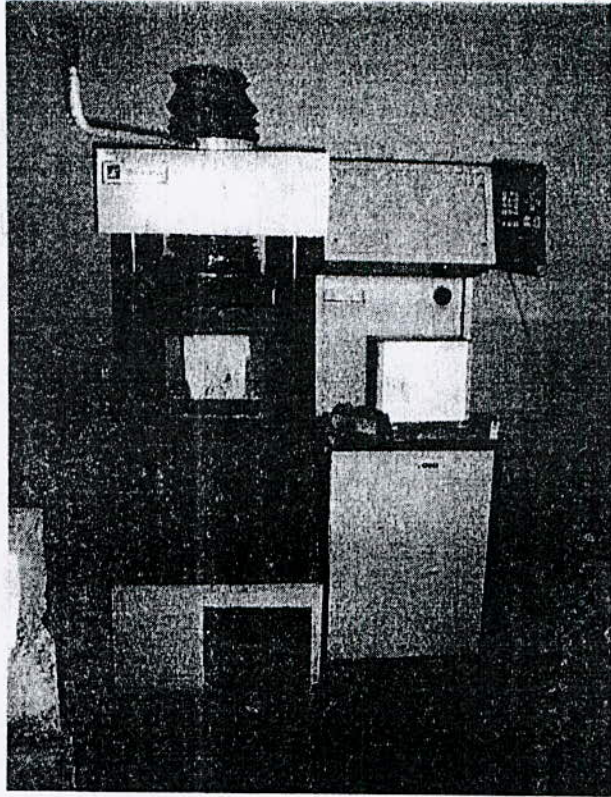
1. Pour le dosage 250 kg/ m³, les résultats sont satisfaisants, mais moins performants que ceux du dosage 350 kg/m³.
Il faut plutôt chercher des rapports E/C plus adéquats. On suggère : $1 < E/C < 1,2$.
En outre, on pense que l'ajout d'un super plastifiant augmenterait les performances des mortiers. Toutefois reste à déterminer leur durabilité.
1. Pour les mortiers confectionnés à base de sable issu du concassage d'un mur de maçonnerie, ou de sable issu d'un mélange de 10% de plâtre et de sable naturel, on peut suggérer des proportions en plâtre inférieures. Une autre suggestion serait d'introduire avec le plâtre des matériaux compacts et d'une porosité minimale tels que les granulats naturels, les mâchefers et le verre etc....
Le plâtre élément favorisant l'accélération de la prise des mortiers, on peut penser que l'ajout d'un retardateur de prise tels que le sulfate de soude ou le borax est nécessaire pour une bonne maniabilité et de meilleures performances des mortiers.

BIBLIOGRAPHIE

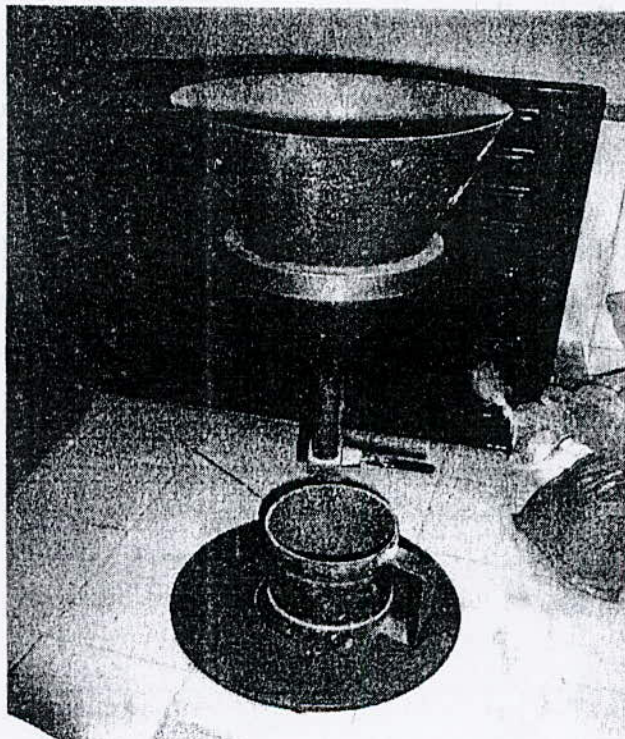
- [1] **Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie** : Les déchets trouvent leurs voies. www.Google.fr
- [2] **Universalise (encyclopédie)** : Le recyclage.
- [3] **Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement** : Guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes. Edition 2001.
- [4] **Queband.M, Courtial.M & Buyle-Bodin.F** : Le recyclage des matériaux de démolition. Matériaux et structure Travaux, n° 721, juin 1996, PP. 65 – 72.
- [5] **Bauchard. M & Joubert. JP** : Utilisation en technique routière de granulats provenant du concassage de béton de démolition. LCPC, Nice, n° 134, novembre – décembre 1984, PP. 53 – 57.
- [6] **Société royale belge des ingénieurs et des industriels** : Valorisation de déchets en matériaux recyclés pour la construction. www.srbii.be.
- [7] **Pimienta .P, Ruban .M** : Recyclage des déchets de démolition à base de plâtre. FRA. Edition 1997.
- [8] **F Ridgley. H** : Riding the construction and demolition wave in California. Waste Age 29 (6), juin 1998, PP. 108 – 115.
- [9] Profil de l'Algérie application d'action 21, examen des progrès accomplis depuis la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, 1992. www.algeria.com.
- [10] **Nathalie Delville** : Les déchets trouvent leurs voies. 17 janvier 2003.
- [11] **Ademe agence de l'environnement**
- [12] **Bonanni. Mc & Serra. GG** : Guidelines for research in management and recycling of construction wastes. Construction et environnement.
- [13] **Ademe /apcede** : Bien construire son projet de démolition sélective. www.adem.fr.
- [14] **Clicquot. C** : Bien gérer les déchets de chantier. Environnement, n° 1583, décembre 1999 – janvier 2000, PP. 30 – 37.
- [15] **Ademe** : Le bâtiment se recycle. www.ademe.fr
- [16] **Bedjou.S** : Etude du recyclage de débris de briques. Thèse de Magister.ENP.
- [17] **Debieb.F** : Valorisation de déchet de brique et béton de démolition comme agrégat de béton. Thèse de magister université de Blida.
- [18] **Desmyler. J & DeCuyper. K** : Règles d'or pour la construction durable. CSTC magazine. Pratique, été 2000, PP. 15 – 27.
- [19] **Ruchet. M & Vimond. E** : Déconstruction sélective : expérimentation à Mulhouse. CSTB magazine n° 101, janvier – février 1997, PP. 44 – 50.
- [20] **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)** : Mécanique des bâtiment T2.

- [21] **Technique de l'ingénieur** : le plâtre. C 910.
- [22] **Marc Nolhier** : Construire en plâtre. Edition : L'harmastian.
- [23] **Duriez.M** : Traité de matériaux de construction.T1.Edition Dunod.
- [24] Fiche technique du ciment CPJ.
- [25] Norme Française. Granulats. Analyse granulométrique par tamisage, AFNOR, Paris, 1990.
- [26] Norme Française : Mesures des masses volumiques, coefficients d'absorption et teneur en eau des sables, AFNOR, Paris, décembre 1990.
- [27] Norme Française : Granulats. Equivalent de sable, AFNOR, Paris, septembre 1998.
- [28] Norme Française : Granulats. Détermination de la propreté superficielle, AFNOR, Paris,
- [29] Norme Européenne : Détermination des résistances mécaniques, AFNOR, Paris, mars 1999.
- [30] Norme Européenne : Méthodes d'essai, partie 5. Détermination de l'absorption capillaire, novembre 1995.
- [31] Norme française. Liants hydrauliques. Définition, classification et spécifications des ciments, AFNOR, Paris, décembre 1981.
- [32] **Hansen. TC**, : Recycled aggregates and recycled aggregates concrete. Third State-of-the art report 1945-1989. Building Materials Laboratory, PP. 1 – 160.
- [33] **Hancen.TC** : Recycling of demolished concrete and masonry. Rilem Report n°06, London, F & FN, Spon 1992.
- [34] **Coquillat.G**: Recyclage des matériaux de démolition dans la confection des bétons. Annales de L'ITBTP, N°428, France, Octobre 1984.

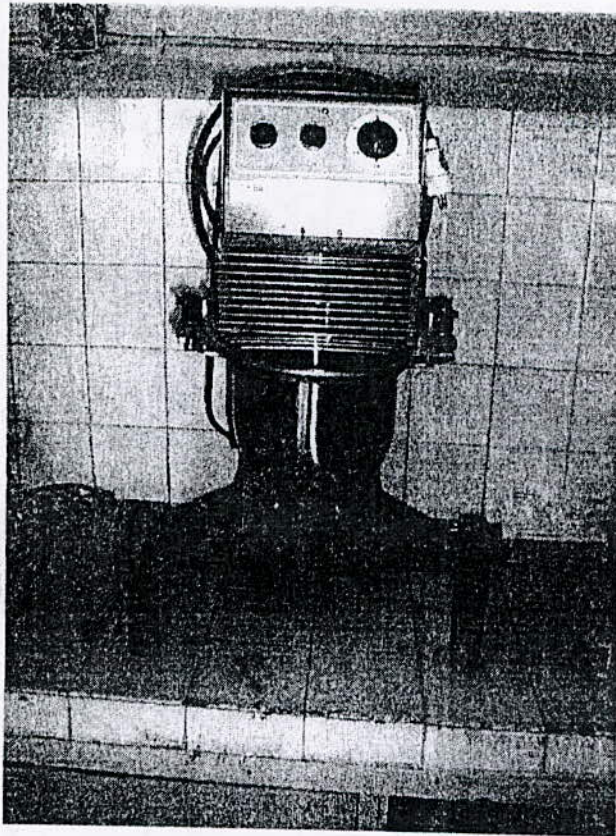
ANNEXE



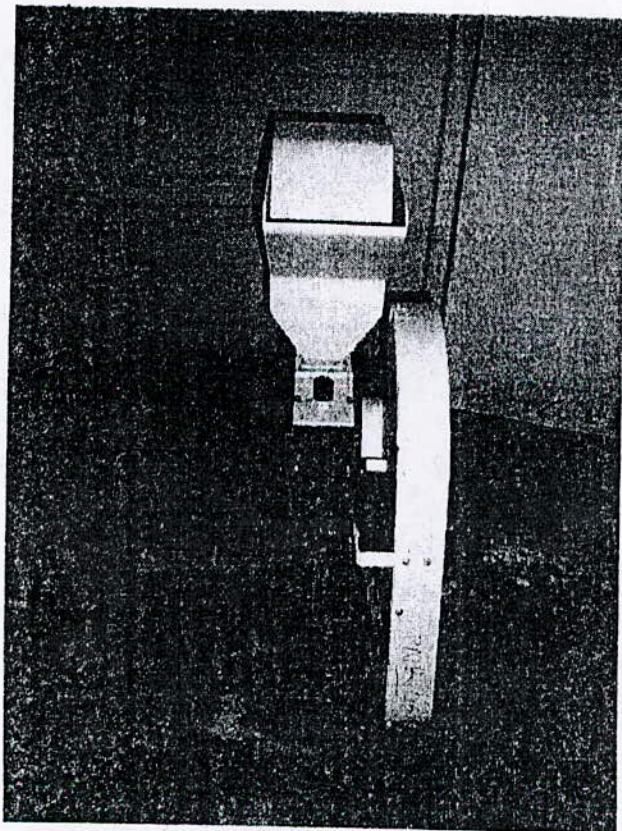
Presse hydraulique



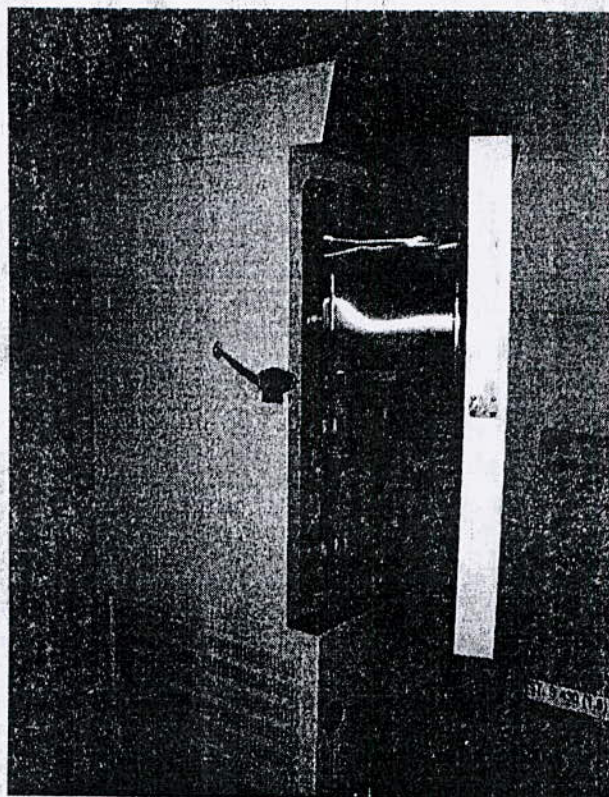
L'entonnoir



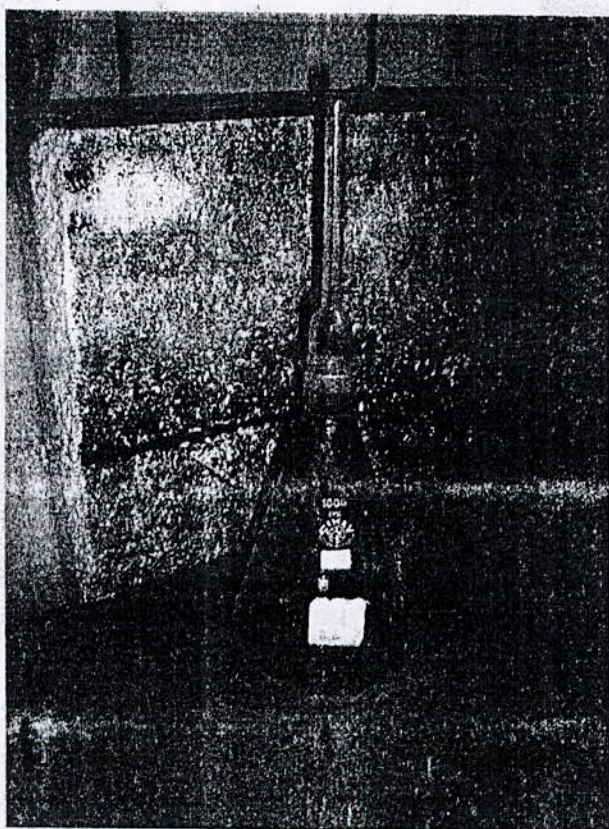
Malaxeur



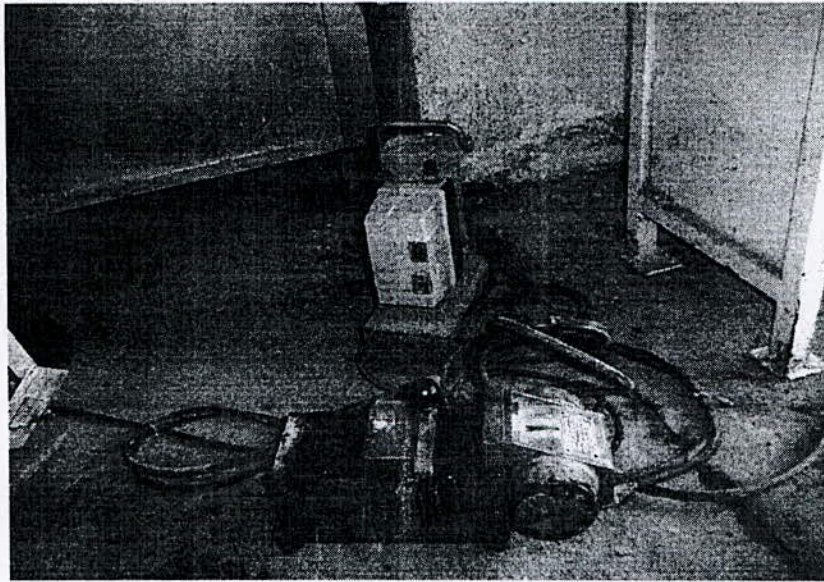
Concasseur a mâchoire



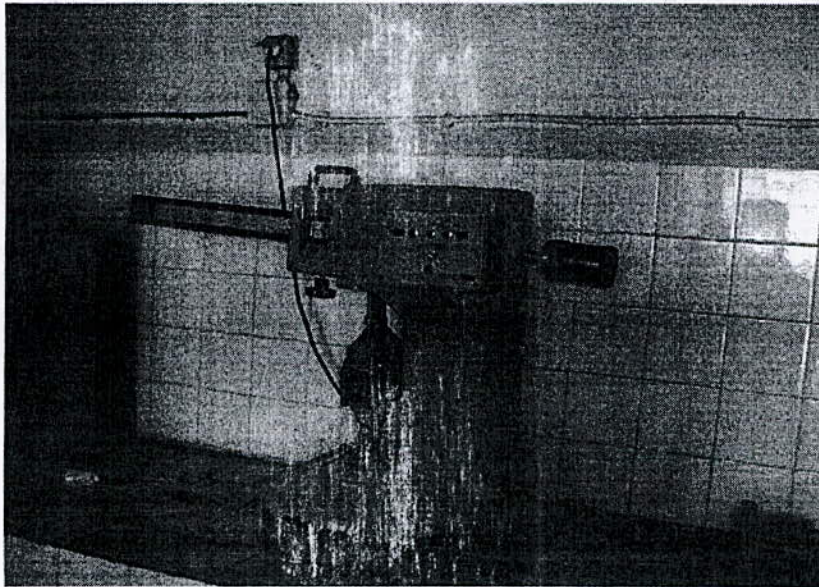
Enceinte climatique



Pycnomètre



Maniabilimètre



Appareil de flexion

Caractéristiques du mortier témoin

Masse volumique apparente (kg/m ³)		Résistance à la compression (MPa)		Résistance à traction (MPa)	
7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
2.06	2.15	16.13	25.65	5.76	6.23

Liste des tableaux

Tableau 5.1 Essais effectués sur les matériaux	22
Tableau 6.1 Masse volumique des deux sables	30
Tableau 6.2 Coefficient d'absorption d'eau des deux sables	30
Tableau 6.3 Compacité et porosité des deux sables	31
Tableau 6.4 Equivalent sable des deux sables	31
Tableau 6.5 Masse volumique des trois sables	33
Tableau 6.6 Coefficient d'absorption d'eau des trois sables	33
Tableau 6.7 Compacité et porosité des trois sables	34
Tableau 6.8 Equivalent sable des trois sables	34
Tableau 6.9 Maniabilité des mortiers préparés	35
Tableau 6.10 Masses volumiques apparentes des mortiers de sable recyclé	37
Tableau 6.11 Résistance à la compression	40
Tableau 6.12 Résistance à la traction par flexion	43
Tableau 6.13 Retraits obtenus à différents âges	47
Tableau 6.14 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité au cours du temps	48
Tableau 6.15 Masses volumiques apparentes des mortiers de sable recyclé	49
Tableau 6.16 Résistance à la compression	52
Tableau 6.17 Résistance à la traction par flexion	55
Tableau 6.18 Retraits obtenus à différents âges	58
Tableau 6.19 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité au cours du temps	59

Liste des figures

Figure 2.1 Structure du modèle informatisé d'optimisation du démontage et du recyclage des bâtiments résidentiels	7
Figure 4.1 Vue du sable naturel prise avec le vidéomicroscope ($\times 50$)	17
Figure 4.2 Vue du sable recyclé prise avec le vidéomicroscope ($\times 50$)	18
Figure 4.3 Vue de S_{RB} prise avec le vidéomicroscope ($\times 25$)	18
Figure 4.4 Vue du plâtre recyclé prise avec le vidéomicroscope ($\times 175$)	19
Figure 5.1 Dispositif de l'écrasement à la compression	25
Figure 5.2 Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire	26
Figure 6.1 Distribution granulométrique des deux sables	29
Figure 6.2 Distribution granulométrique des trois sables	32
Figure 6.3 (a) Evolution de la maniabilité en fonction du rapport E/C pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3	35
Figure 6.3 (b) Evolution de la maniabilité en fonction du rapport E/C pour un dosage en ciment de 250 kg/m^3	36
Figure 6.4 (a) Evolution de la masse volumique apparente en fonction du temps pour le dosage 350 kg/m^3	37
Figure 6.4 (b) Evolution de la masse volumique apparente en fonction du temps pour le dosage 250 kg/m^3	38
Figure 6.5 Masse volumiques apparentes à 7 j en fonction du rapport E/C et du dosage en ciment	39
Figure 6.6 Masse volumiques apparentes à 28 j en fonction du rapport E/C et du dosage en ciment	39
Figure 6.7(a) Evolution de la résistance a la compression pour chaque dosage en ciment	40
Figure 6.7(b) Evolution de la résistance a la compression pour chaque dosage en ciment	41
Figure 6.8 Résistance à la compression à 7 jours en fonction du rapport E/C pour chaque dosage en ciment	42
Figure 6.9 Résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport E/C pour chaque dosage en ciment	42

Figure 6.10 (a) Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour le dosage en ciment 350 kg/m ³	43
Figure 6.10 (b) Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour le dosage en ciment 250 kg/m ³	44
Figure 6.11 Vue de l'état de repture d'un prisme de mortier à base de granulats recyclés	45
Figure 6.12 Variation des résistances à la traction par flexion à 7j en fonction de E/C	46
Figure 6.13 Variation des résistances à la traction par flexion à 28 j en fonction de E/C	46
Figure 6.14 (a) Evolution du retrait à travers le temps	47
Figure 6.14 (b) Evolution de l'absorption d'eau par capillarité des mortiers	48
Figure 6.15 Evolution de la masse volumique apparente des mortiers à base de sable S _{RB} issu du concassage d'un mur de maçonnerie (brique+plâtre+mortier ciment) en fonction du temps	50
Figure 6.16 Evolution de la masse volumique apparente en fonction du temps des mortiers à base de sable S _{NP} constitué de Sable naturel + 10%plâtre recyclé	50
Figure 6.17 Masse volumiques apparentes à 7 j en fonction du rapport E/C et du dosage en ciment	51
Figure 6.18 Masse volumiques apparentes à 28 j en fonction du rapport E/C et du dosage en ciment	52
Figure 6.19 (a) Evolution de la résistance à la compression pour S _{RB}	53
Figure 6.19 (b) Evolution de la résistance à la compression pour S _{NP}	53
Figure 6.20 (a) Résistance à la compression à 7 jours en fonction du rapport E/C	54
Figure 6.20 (b) Résistance à la compression à 28 jours en fonction du rapport E/C	54
Figure 6.21 Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour (S _{RB})	56
Figure 6.22 Evolution de la résistance à la traction par flexion dans le temps pour (S _{NP})	56
Figure 6.23 Variation des résistances à la traction par flexion à 7j en fonction de E/C	57
Figure 6.24 Variation des résistances à la traction par flexion à 28 j en fonction de E/C	57
Figure 6.25 Evolution du retrait à travers le temps	58
Figure 6.26 Evolution de l'absorption d'eau par capillarité des mortiers	59