

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Matériau de Génie Civil

Par : - ABDELLI Zakaria

- BELOUAHRI Hicham

Sujet

**Les effets des déchets de plastique réemployés sur le transfert
d'humidité en phase liquide d'un mortier cimentaire**

Soutenu publiquement, le 01 / 07 / 2023 , devant le jury composé de :

M/ziani houciné	Grade	Univ-BBA	Président
M/deboucha sadek	Grade	Univ-BBA	Examineur
M/ GUELMINE Layachi	Grade MCA	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

Remercîments

Tout d'abord, nous remerciers Allah le Tout-Puissant de m'avoir donnée le courage et la patience pour terminer ce travail modeste.

Nous remercie cordialement, Mon encadreur Mr layachi guelmine, de m'avoir proposé ce thème, de m'avoir guidé et suivi durant l'accomplissement de ce travail.

Nous tiens à remerciers les membres de jury qui ont acceptés De juger et examiner notre travail.

Nous tiens à remerciers tous ce qui a contribué de près et de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

nous dédie ce modeste travail, Fruit de nombreuses années d'étude à :

Mes chers parents ma mère et mon père Pour leur patience, leur soutien et
leurs encouragements

A ma sœur

A mes amis et à tous mes collègues de l'Université

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de l'enseignement supérieur

A tous ceux qui nous ont aidés de proche et de loin. Que dieu accepte notre
travail.

Table des matières

Chapitre I : Analyse bibliographique	3
I.1 Introduction	4
I.2 Mortier de ciment :	4
I.2.1 Constituants de mortier :	4
I.3.1 Propriétés de mortier :	6
I.4.1 Structure de la pâte de ciment :	6
I.5.2 Les paramètres influençant les propriétés physicomécaniques de mortier :	10
I.6 Transfert d'humidité dans les Matériaux cimentaires :	13
I.6.1 Conséquences de l'humidité sur la performance mécanique et thermique d'un matériau de construction :	13
I.7 Les différents mécanismes de pénétration de l'humidité à l'intérieur d'un matériau poreux :	14
I.9 Description physiques d'un matériau poreux :	17
I.9.1 <i>La phase solide</i> :	17
I.9.2 <i>La phase liquide</i> :	17
I.9.3 <i>La phase gazeuse</i> :	17
I.10 <i>Modélisation du transfert d'humidité dans un matériau poreux</i> :	18
I.11 <i>Les déchets industriels</i> :	21
I.11.1 <i>Définition</i>	21
I.11.2 <i>Les types de déchets industriels</i> :	22
I.12 Les modes de gestion des déchets plastique :	24
I.13 <i>Valorisation des déchets plastiques dans le domaine de Génie Civil</i> :	26
I.14 <i>l'effet des granulats de plastique sur les propriétés des matériaux cimentaires</i>	26
Chapitre II : matériaux et méthodes expérimentales	30
II.1 Introduction	31
II.2 Caractérisation des matières premières :	31
II.2.1 Essai sur le sable	31
II.2.1.1 Analyse granulométrique : NFP.18-560[21]	31
II.4 Essai sur le ciment :	35
II.4.3 L'eau de gâchage :	37
II.5 Propriétés rhéologiques du ciment	37
II.5.1 Consistance normale : NFP.15-573[21]	37
II.5.2 Prise : NFP 15-573[21]	38

II.6 Etude du mortier frais :.....	38
II.6.1 Préparation des mortiers étudiés :.....	39
II.7 Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :	41
II.7.1 Ouvrabilité :.....	41
II.8.1 Propriétés physiques :.....	42
II.10.2 Propriétés Mécaniques :	45
II.11 Etude de durabilité au séchage-mouillage :.....	47
Chapitre III : Résultats et discussion	49
III.1 Introduction	50
III.2 Propriétés fraîches :	50
III.2.1 Consistance :.....	50
III.3.1 Vitesse ultrasonique :	51
III.3.2 Résistance en flexion.....	52
III.3.3 Résistance en Compression :	53
III.4 Transfert d'humidité en phase liquide :	54
III.4.1 Détermination de la sorptivité des mortiers :.....	55
Conclusion	57
Bibliographie	58

تسبب تراكم نفايات البوليمر الغير قابلة للتحلل مثل البلاستيك تهديد خطير على الطبيعة والبيئة. في دراستنا، قمنا بإضافة حبيبات البلاستيك المعاد تدويره (GPR) إلى الطين العادي لتقييم تأثيرها على السلوك الميكانيكي ونقل الرطوبة في الطور السائل للطين المدروس. تم إجراء تحقيق تجريبي على طين الأسمنت يتضمن استبدال كتلي بنسب مختلفة من GPR بالنسب التالية: 0%، 4%، و 12%. تظهر نتائجنا أن إدماج GPR قلل بشكل كبير من قوة الضغط والثني وسرعة الموجات فوق الصوتية للطين البلاستيكي مقارنة بالطين العادي. علاوة على ذلك، تحسنت خصائص نقل الرطوبة في الطور السائل مثل قابلية الامتصاص مع إدماج GPR. وعلاوة على ذلك، أدى إدماج GPR إلى انخفاض كبير في قابلية العمل للمركبات المدروسة.

1.1 الكلمات المفتاحية: حبيبات البلاستيك المسترجع، الملاط الاسمنتي، إنتقال الرطوبة، امتصاصية، السلوك الميكانيكي، مقاومة الضغط.

Abstract:

The accumulation of non-degradable polymer waste such as plastic poses a dangerous threat to nature and the environment. In our study, we included recycled plastic granules (GPR) with regular mortar to assess their effect on the mechanical behavior and liquid-phase moisture transfer of the studied mortars. An experimental investigation was conducted on a cement mortar incorporating different mass substitutions of GPR at the following percentages: 0%, 4%, and 12%. Our results show that the incorporation of GPR significantly reduced the compressive and flexural strength, as well as the ultrasonic velocity of the plastic mortars compared to ordinary mortar. Furthermore, the inclusion of GPR improved the moisture transfer properties in the liquid phase, such as sorptivity. Moreover, the inclusion of GPR led to a significant decrease in the workability of the studied composites.

Keywords: Recycled Plastic Aggregates (RPA), Cement Mortar, Moisture Transfer, Sorptivity, Recycled RPA, Mechanical Behavior, Résistance en compression Compression.

1.2 Résumé :

1.3 L'accumulation des déchets polymère non dégradables comme le plastique représente une menace dangereuse pour la nature et l'environnement. Dans notre étude, on inclut les granulats de plastique recyclés GPR avec le mortier normal pour estimer leur effet sur le comportement mécanique et de transfert d'humidité en phase liquide des mortiers étudiés. Une étude expérimentale a été conduite sur un mortier de ciment incorporant des dosages des GPR par substitution massique pour les pourcentages suivants : 0 %, 4 %, et 12% . Nos résultats montrent que l'incorporation des GPR a diminué significativement la résistance en compression, en flexion, la vitesse ultrasonique des mortiers plastiques par rapport au mortier ordinaire. En outre, l'inclusion des GPR améliore les propriétés de transfert d'humidité en phase liquide comme la sorptivité. De plus, l'inclusion des GPR produit une chute importante de l'étalement de table des composites étudiés.

1.4 Mots clés : Granulats de Plastique Recyclés GPR, Mortier de ciment, transfert d'humidité, sorptivité, Recyclés MGPR, Comportement mécanique, compression.

Liste des figure :

FIGURE I.1: INFLUENCE DE LA DUREE DE L'HYDRATATION SUR L'EVOLUTION POROSIMETRIQUE D'UNE PATE DE CIMENT DONT LE RAPPORT E/CET VOISIN DE 0.70 [4].....	8
FIGURE I. 2.: MOLECULE DE GEL C-S-H SELON LE MODELE DE FELDMAN [FELDMAN ET AL, 1968] RAPPORTE PAR [ADAM, 1998].	9
FIGURE I. 3FIGURE3 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PATE DE CIMENT A LETAT FRAIS ET LETAT DURCI.....	11
FIGURE I. 4 FIGURE 4 : INFLUENCE DE RAPPORT E/C SUR LEVOLUTION POROSIMIMETRIQUE DE LA PATE DE CIMENT PORTLAND	12
FIGURE I. 5 FIGURE 5 : INFLUANCE DHUMIDITE SUR LA CONDUCTIVE THERMIQE DE CERTAIN MATERIAUX DE CONSTRUCTION.....	13
FIGURE I. 6 :DETERATION DE LENVELOPPE INFERIEURE DUN BATIMENT PAR LEFFET DHUMUDITE AMBIANT	14
FIGURE I. 7: LA GOUTTE DEAU PENETRE FIGURE 8FIGURE 8: LA GOUTTE DEAU NE FIGURE 8FIGURE 8: LA GOUTTE DEAU NE PENETRE PAS DANS LE MATERIAU FIGURE 8FIGURE9NE PENETRE PAS DANS LE MATERIAU.....	15
FIGURE I. 11 : EN L'ABSENCE DE VENT, L'EAU DE PLUIE RUISSLE A LA SURFACE DE LA PARO ET DU PAREMET [13].....	16
FIGURE I. 12: PHENOMENE DE CAPILLARITE : PLUS LE TUBE EST FINE, PLUS LE LIQUIDE S'ELEVE PLUS RAPPORTE PAR GUELMINE [13].	17
FIGURE I.13 : SCHEMA DE L'ESSAI D'IMBIBITION CAPILLAIRE UNIDIRECTIONNEL.....	20
FIGURE I.114: EVOLUTION DE LA DIFFUSIVITE HYDRIQUE D'UN MATERIAU EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE [18,19].....	21
FIGURE I.15 : EVOLUTION DE LA DIFFUSIVITE HYDRIQUE DE MORTIER DE CIMENT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU VOLUMIQUE AVEC DIFFERENTES TEMPERATURES D'APRES MEROUANI [20]	21
FIGURE I.16 : LES DEFERENTS TYPES DES DECHETS.....	23
FIGURE I.17 QUELQUES EXEMPLES DES DECHETS DANGEREUX	24
FIGURE I.18: TYPE DES AGREGATS PLASTIQUES UTILISES DANS LE BETON / MORTIER.....	25
FIGURE I.19: ETALEMENT DU BETON EN FONCTION DU POURCENTAGE DE E-PLASTIC [31]	27
FIGURE I.20: LA VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU POURCENTAGE DES AGREGATS PLASTIQUES A 28 JOURS [28].....	28
FIGUREV21: LA VARIATION DE LA RESISTANCE A LA FLEXION EN FONCTION DU POURCENTAGE DES AGREGATS PLASTIQUES A 28 JOURS [2].....	28
FIGURE I.22: COEFFICIENTS DE LA SORPTIVITE DU BETON A DIFFERENTS VOLUMES DE GRANULATS HIPS [31].	29
FIGURE II .1 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE	31
FIGURE II .2: COURBES GRANULOMETRIQUES DES GRANULATS DE PLASTIQUE.....	32
FIGURE II .3:ESSAI D'EQUIVALENT DE SABLE.....	33
FIGUREV4:MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	34
FIGURE II .5:MALAXEUR NORMALISE EN 196-1.	39
FIGURE II .6:GRANULATS DE PLASTIQUES UTILISES.	40

FIGURE II .7: ESSAI D'OUVRABILITE	41
FIGURE II .8: TABLE D'ETALEMENT.....	42
FIGUREV9: DISPOSITIVE DE MESURE DE LA SORPTIVITE PAR CAPILLARITE.....	44
FIGURE II .10: SCHEMA MECANIQUE DE L'ESSAI DE RUPTURE PAR FLEXION	45
FIGURE II .11: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE L'ESSAI DE FLEXION.....	45
FIGURE II .12: SCHEMA MECANIQUE DE L'ESSAI DE RUPTURE PAR FLEXION	46
FIGURE II .13: DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE L'ESSAI DE FLEXION.....	46
FIGURE II .14: DISPOSITIF DE L'ESSAI DE RUPTURE EN COMPRESSION	47
FIGURE II .15:UNE PHOTO DES EPROUVETTE DANS L'ETUVE	48
FIGURE II .16: MOUILLAGE DES SPECIMENS DANS UN BAC D'EAU POTABLE.....	48
FIGURE.III.1. EVOLUTION DE L'ETALEMENT EN F ↓ DU DOSAGE EN GPR ET LE RAPPORT E/C.....	51
FIGURE.III.2. VARIATION DE LA VITESSE ULTRA-SONIQUE EN FONCTION DU DOSAGE EN GPR ET LE RAPPORT E/C DES MORTIERS ETUDIES	52
FIGURE.III.3. EVOLUTION DE RESISTANCE EN TRACTION PAR FLEXION EN FONCTION DU DOSAGE EN GPR ET RAPPORT E/C DES MORTIERS ETUDIES A L'AGE DE 28 JOURS	53
FIGURE.III.4. RESISTANCE EN COMPRESSION EN FONCTION DU RAPPORT E/C ET LE DOSAGE EN GPR DES MORTIERS PREPARES	54
FIGURE .III.5: TAUX D'ABSORPTION D'EAU EN FONCTION DES COMPOSITES INCORPORANT 4 , 8 ET 0 % DE GPR RESPECTIVEMENT.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Liste des tableaux

TABLEAU :1.1 DESIGNATION DES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT EN FONCTION DE LEUR COMPOSITION	5
TABLEAU II.1 : RESULTATS D'ESSAIS D'EQUIVALENT DE SABLE TESTE	33
TABLEAU II.2 : OPERATION DE MALAXAGE DES MORTIERS	39
TABLEAU II.3 : COMPOSITION DES MORTIERS PREPARES	40

Introduction générale

Le recyclage de certains déchets dans les matériaux de construction constitue une alternative, à faible coût économique, aux granulats minéraux conventionnels. Parmi ces matières recyclables, on distingue les déchets de plastique dont, leur accumulation constitue une source potentielle de problèmes environnementaux. Le but de cette étude est l'évaluation de l'effet d'incorporation des granulats de plastiques réemploies sur les propriétés mécaniques et de transfert d'humidité des mortiers de ciment. De plus, on examinera les potentialités de l'utilisation des déchets de plastique dans une matrice cimentaire, par substitution aux granulats minéraux conventionnels.

On ne peut concevoir les matériaux cimentaires sans connaître l'influence de l'humidité sur son comportement, non seulement elle induit des phénomènes propres tels que le gonflement et le retrait, mais elle influe également sur les autres caractéristiques telles que la chute de la résistance mécanique. Même si la pâte est faite de béton, de mortier ou de matériaux purs, le processus de transfert d'humidité se fait généralement à travers la structure poreuse de la matrice, de sorte que les agrégats sont souvent non absorbants. Le mortier de ciment souvent un échange d'humidité entre le centre extérieur et intérieur du bâtiment et siège vice versa. Face à des diverses manifestations de l'humidité. Mais il serait impossible de comprendre les raisons, ainsi que l'évaluation des risques et plus à traiter sans une étude préalable du comportement de ces matériaux en échange d'humidité. Dans le même contexte, notre science vise en réalité à étudier le risque de condensation de l'humidité dans le mortier de ciment lors du changement d'humidité.

Le matériau étudié qui, contenant différentes fractions de granulats issus du broyage de déchets de plastique. Pour atteindre cet objectif, des matériaux de types "mortier de ciment" sera ainsi élaboré, en substituant différentes fractions minérales par des particules de plastique. Il s'agira d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur les propriétés de transfert d'humidité des mortiers incorporant les déchets de plastiques aux états frais et durci, notamment leurs limites granulaires. Après l'optimisation de la formulation, des tests de caractérisation, aussi bien physico-mécaniques, seront conduits afin de mettre en évidence l'effet des particules de plastique sur de comportement hydrique, physique et mécanique des mortiers de plastique.

Avec le mortier de ciment comme un exemple de l'application de la modélisation du phénomène, et aussi à cause du manque de temps pour faire ce travail, ainsi que l'absence de conditions appropriées dans le laboratoire accompagné du manque de matériel de laboratoire, où l'étude a

été réalisée dans des conditions ambiantes isothermes dans le laboratoire sous l'hypothèse de la température et de pression de laboratoire. Afin d'atteindre cet objectif, ce travail a été subdivisé en trois chapitres.

La première partie est consacrée à des rappels de notion qui seront utilisées au cours de ce travail (les différents types des mortiers, milieu poreux, transfert de masse, ...etc.) et les résultats trouvés par les différents chercheurs dans le domaine de transfert de masse.

Une deuxième partie exposera les techniques expérimentales utilisées pour la détermination des caractéristiques mécaniques et hydriques des matériaux élaborés.

Les résultats expérimentaux des caractéristiques physico-mécaniques seront rassemblés dans le chapitre III.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion qui récapitule les principaux résultats recueillis lors de cette recherche.

Chapitre I : Analyse bibliographie

I.1 Introduction

Le présent chapitre est une analyse bibliographique sur l'influence de rapport E/C sur les propriétés de transfert d'humidité en phase liquide de mortier de ciment incorporant les granulats de plastique recyclés. Il sera divisé en quatre grandes parties. La première partie portera sur la description des constituants du mortier de ciment. La deuxième partie est consacré à l'effet du rapport E/C sur les propriétés des matériaux cimentaires. La troisième partie est consacrée à l'influence des déchets de plastique sur les propriétés des matériaux cimentaires. Dans la quatrième partie, nous avons décrit les paramètres utilisés pour l'étude de phénomène de transfert d'humidité dans les matériaux cimentaires.

I.2 Mortier de ciment :

C'est un mélange dans des proportions convenables (suivent la destination et l'emploi du mortier) de sable, de liant et d'eau, pour former une pâte de plasticité déterminée qui durcie avec le temps pour atteindre des caractéristiques similaires à une pierre naturelle. En plus de la liaison et de la cohésion qu'il assure aux éléments de maçonnerie, de la protection de la construction (rôle d'enduit) contre l'humidité due aux intempéries. Le mortier est une matière première entrant dans la confection des éléments préfabriqués et est le principal constituant du béton, il a pour rôle de colmater les vides inter-granulaires [1,2].

I.2.1 Constituants de mortier :

I.2.1.1 Sable

C'est un matériau naturel ou artificiel dont au moins 50% des diamètres de grains sont supérieurs à 80 μm et dont la taille n'excède pas 5mm [1,2]. La classification du sable est fondée sur trois paramètres essentiels : o La provenance des grains (calcaire, silice) ; o La granularité ; o La propreté. En effet, plusieurs types de sables sont à distinguer, parmi lesquels ontrouv :

- **Les sables naturels** : Ils sont utilisés en construction des différents projets de construction et prélevés soit dans les alluvions des rivières ou des fleuves (sable roulé), soit sur les plages ou les dunes naturelles.
- **Les sables artificiels** : Sont soit du sable de concassage ou du sable roulés provenant de la production des matériaux concassés.

I.2.1.2 Ciment :

C'est un liant hydraulique artificiel fabriqué essentiellement à partir d'un mélange de calcaires (environ 75%), d'alumine et de silice qui se trouvent dans l'argile (environ 25%). Le procédé de fabrication du ciment consiste essentiellement à broyer des matières premières, à les mélanger dans certaines proportions puis à les cuire dans un grand four rotatif à une température atteignant environ 1450°C, température à laquelle le matériau fond partiellement jusqu'à former des nodules connus sous le nom de clinker. Le clinker refroidi puis broyé en poudre fine, opération de laquelle on ajoute un pourcentage de gypse (de 3 à 5% de masse de clinker) et un pourcentage d'ajouts inertes ou actifs (laitier, pouzzolane, cendre, calcaire,...) pour obtenir le ciment désiré selon le type d'ouvrage réalisé [1, 4]. Les ciments sont alors classés en fonction de leur composition en cinq types principaux selon la norme NFP15-301 (voir tableau I.1). Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne [3].

Tableau :1.1 désignations des différents types de ciment en fonction de leur composition

	Ciment Portland	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment au laitier et aux cendres		
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLK-CEM V/A	CLK-CEM V/B	
Clinker (k)	≥ 95%	≥ 80% ≤ 94%	≥ 65% ≤ 74%	≥ 35% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 34%	≥ 5% ≤ 19%	≥ 65% ≤ 90%	≥ 45% ≤ 64%	≥ 40% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 39%	
Laitier (S)	•	6% ≤ totale	21% ≤ totale	≥ 36% ≤ 65%	≥ 66% ≤ 80%	≥ 81% ≤ 95%	•	•	≥ 18% ≤ 30%	≥ 31% ≤ 50%	
Pouzzolane (Z)	•	≤ 20% (fumée de silice)	≤ 35% (fumée de silice)	•	•	•	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total	
Cendres siliceux (V)	•			≤ 35% (fumée de silice)	•	•	•	≤ 10% (fumée de silice)	≤ 55% (fumée de silice)	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	•			•	•	•	•	•	•	•	•
Cendres calcaïques (W)	•	≤ 10%	≤ 10%	•	•	•	•	•	•	•	
Schistes (T)	•			•	•	•	•	•	•	•	
Calcaire (L)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
Fillers (F)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

I.2.1.3 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. Cette eau doit être propre et satisfaire aux

exigences de la norme actuelle NF.18-303 [3]. L'eau utilisée dans la préparation des gâchés des mortiers élaborés dans ce travail est une eau potable du robinet.

I.3.1 Propriétés de mortier :

Les propriétés principales d'une pâte de mortier sont la fluidité, l'hydrophile et la résistance mécanique

I.3.1.1 Ouvrabilité

Une pâte de mortier peut avoir, suivant les composants, des consistances différentes, depuis l'état sec jusqu'à l'état fluide. Les mortiers de maçonnerie, des travaux de finissage des bâtiments et autres doivent être suffisamment maniable. L'ouvrabilité de la pâte de mortier détermine la maniabilité, c'est-à-dire le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie, sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérente à la surface de base [1].

I.3.1.2 Résistance mécanique :

La résistance d'un mortier au cours du durcissement dépend de l'activité du liant et du rapport E/C. Elle dépend aussi de la quantité de ciment et du sable employé. D'autre part, la résistance du mortier est fonction de la résistance des produits de gel (silice de calcium hydraté S-C-H). Cependant, la source réelle de la résistance du mortier n'est pas entièrement maîtrisée [1, 2,4]. Mais dépend probablement de deux types de liaisons homogènes :

- Le premier type est l'attraction physique entre les surfaces solides séparées seulement par les petits produits de gel (moins de 3nm). Cette attraction est généralement connue sous le nom de force de Van Der Waals.
- La deuxième source de cohésion vient des liaisons chimiques. Puisque le gel de ciment n'est pas gonflant, c'est-à-dire que les particules ne peuvent être dispersées en ajoutant de l'eau, il semble que les particules de gel s'entrecroisent sous l'effet des forces chimiques.

Ces dernières sont très fortes que les forces de Van Der Waals, mais les liaisons chimiques ne couvrent qu'une faible fraction de la surface des particules de gel.

I.4.1 Structure de la pâte de ciment :

La pâte de ciment est essentiellement : constituée d'eau et de ciment. Vis-à-vis de ces deux éléments sa composition est définie par le rapport (E/C). Dans ce rapport E et C représentent les

concentrations d'eau et de ciment exprimées en masse pour un volume d'air occlus qui n'est pas connu à priori car il dépend de la consistance de la pâte et des moyens employés pour la mise en œuvre.

1.4.1.1 Réaction d'hydratation :

On entend par hydratation du ciment toutes les réactions qui se développent entre le ciment et l'eau. En d'autres termes, les silicates et aluminates en présence d'eau forment des produits d'hydratations (gel) qui donnent avec le temps une masse ferme et dure (la pâte de ciment hydratée). Le Chatelier était le premier qui a remarqué que les produits d'hydratation du ciment sont chimiquement les mêmes que les produits d'hydratation des composés seuls, dans des conditions similaires. Cela a été confirmé plus tard par H.H. Steneinour [5]. Dû au fait que les produits d'hydratation du ciment ont une très faible solubilité dans l'eau; quelque soit le mode de précipitation des produits d'hydratation, la vitesse de cette hydratation décroît continuellement, si bien que, même longtemps après, il reste une quantité appréciable de ciment non hydraté. Par exemple, après 28 jours de contact avec l'eau, T.C. Powers [6] a constaté que les grains de ciment se sont hydratés jusqu'à une profondeur de $4\mu\text{m}$ seulement et de $8\mu\text{m}$ après une année. Il a montré que l'hydratation totale dans des conditions normales n'est possible que pour les particules de ciment inférieur à $50\mu\text{m}$, par contre, l'hydratation complète a été obtenue par broyage continu du ciment dans l'eau pendant cinq jours.

L'hydratation de ciment s'écoule pendant une durée plus au moins rapide suivant les propriétés physico-chimiques de la poudre du ciment (la finesse, la composition chimique) et les conditions atmosphériques ambiantes. Les courbes de la figure (I.1) renseignent sur l'évolution de la structure porosimétrique au cours du temps : diminution de la porosité interconnectée, existence d'une porosité capillaire à longue échéance pour une teneur en eau de gâchage correspondant à un rapport (E/C) de 0.70 [1, 4,6].

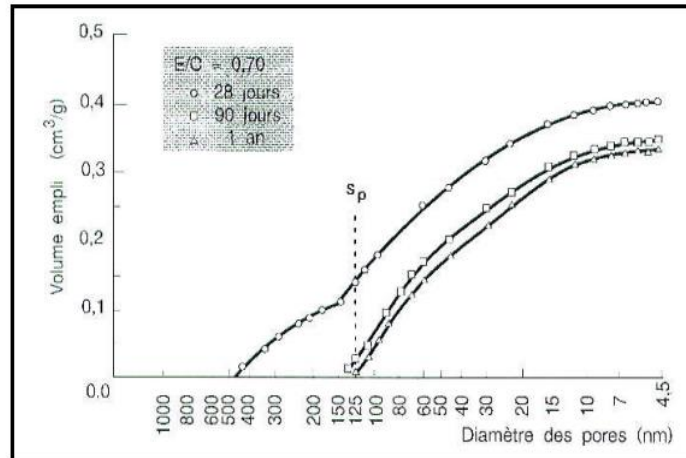


Figure 1.1: Influence de la durée de l'hydratation sur l'évolution porosimétrique d'une pâte de ciment dont le rapport E/C est voisin de 0.70 [4]

1.4.1.2 Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement) :

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit, c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue ; pour les ciments à durcissement rapide, on obtient après quelques jours la quasi-totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois. La plupart des propriétés mécaniques de la pâte de ciment durcie semblent dépendre non pas de la composition chimique du ciment hydraté mais aussi de la structure poreuse des produits d'hydratation (gel) vus au niveau des dimensions colloïdales. Il est donc important d'avoir une bonne illustration des propriétés physiques de la structure du gel de ciment. La pâte de ciment fraîche est un réseau plastique de particules de ciment dans l'eau, mais, une fois que la pâte a fait prise, son volume apparent ou brut demeure approximativement constant. A n'importe quel stade de l'hydratation, la pâte durcie est constituée d'hydrates très mal cristallisés des différents composés considérés collectivement comme un gel, de cristaux de Ca(OH)_2 , de quelques composants mineurs, de ciment non hydraté et le reste d'espaces vides remplis d'eau dans la pâte fraîche. Ces vides sont appelés pores capillaires, mais, à l'intérieur même du gel, il existe des vides interstitiels, appelés pores de gel. La structure de la pâte de ciment a été représentée schématiquement sur la figure (I-2) par Powers T.C [6]. La surface de la phase solide augmente considérablement pendant l'hydratation et une grande quantité d'eau libre se trouve adsorbée sur cette surface. Si aucun mouvement d'eau vers ou à partir de la pâte de ciment ne peut se faire, les réactions d'hydratation consomment presque la totalité de l'eau n'en laissant qu'une trop petite quantité pour saturer les surfaces solides, provoquant ainsi la diminution de l'humidité relative à l'intérieur de la pâte, ce que l'on appelle l'auto dessiccation.

Etant donné que le gel ne peut se former que dans un espace rempli d'eau cette opération continue jusqu'à la fin du processus de durcissement [1, 7, 8].

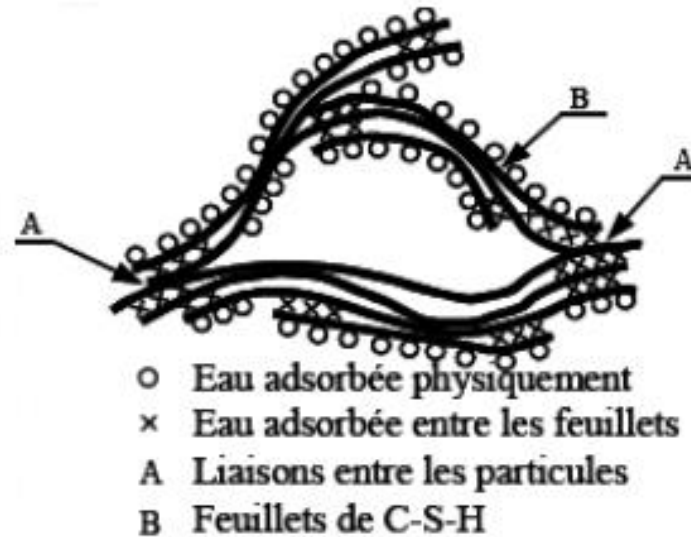


Figure I.2.: Molécule de gel C-S-H selon le modèle de Feldman [Feldman et al, 1968] rapporté par [Adam, 1998].

I.4.1.3 L'eau dans la microstructure de pâte du ciment :

L'eau est indispensable à la fabrication du mortier. Elle joue un double rôle d'hydratation du ciment et d'ouvrabilité du mélange. Tous les vides de la matrice sont plus ou moins remplis d'eau. Sa présence et surtout son mouvement au cours de la vie d'un ouvrage en béton est souvent responsable de phénomènes tels que le retrait de dessiccation, le gonflement, les fissurations observées lors des cycles de gel-dégel [Adam, 1998 ; Dreux, 1998]. Elle joue un rôle important lors de la montée en température du mortier. L'eau se présente dans la pâte de ciment sous divers formes :

- **Eau libre (ou capillaire):** C'est l'eau qui n'a pas participé à la réaction d'hydratation du ciment, la grande finesse du ciment anhydre et la dimension très faible des pores du ciment hydraté font que cette eau est soumise à des forces de surface qui limitent ses possibilités de déplacement. Elle remplit le volume poreux et n'est pas soumise aux

forces d'attraction des surfaces solides. Cette eau est la première à migrer et à s'éliminer en général pour des températures comprises entre 30 °C et 120°C.

- **Eau adsorbée :** C'est l'eau adsorbée sur les surfaces solides. Elle peut être adsorbée physiquement ou chimiquement. L'adsorption physique met en jeu des énergies de type Van der Waals de faible intensité. L'adsorption chimique correspond à la formation de liaison chimique entre les atomes de la surface du solide et les molécules de l'adsorbat.
- **Eau liée chimiquement :** c'est l'eau qui réagit avec les éléments anhydres du ciment. Dans la structure des C-S-H la présence de l'eau sous trois formes (l'eau hydroxyde, l'eau interfeuillet et l'eau interlamellaire) qui sont classées ici par ordre décroissant d'énergie de liaison avec le solide.

1.5.1 Différents types de pore dans la pâte du ciment durci :

Il y a deux types de pore dans la structure de la pâte de ciment durci :

A. Pores capillaires :

A n'importe quel stade de l'hydratation, les pores capillaires représentent la partie du volume brut qui n'a pas été remplie par les produits d'hydratation. Etant donné que ces produits occupent plus du double de la phase solide initiale c'est à dire le ciment, seul le volume du réseau de capillaire diminue. Les travaux de F.P. Glasser [9] indiquent qu'une pâte de ciment à maturité contient peu de pores supérieurs à 1µm et que dans leur majorité ils sont inférieurs à 100nm. Ceux-ci sont de forme variée, ces pores capillaires constituent un système interconnecté distribué aléatoirement à travers la pâte du ciment [1, 9].

B. Pores de gel :

Les pores de gel sont essentiellement des vides interstitiels interconnectés entre les particules de gel en forme d'aiguilles, de plaques ou de feuillets. Leur diamètre nominal étant inférieur à 2 ou 3nm, ce qui correspond à un ordre de grandeur supérieur à la dimension des molécules d'eau. Pour cette raison, l'eau adsorbée possède une pression de vapeur et une mobilité différente de celles de l'eau libre. Ils occupent approximativement 28% du volume total des solides de gel [1,2,4]

1.5.2 Les paramètres influençant les propriétés physicomécaniques de mortier :

1.5.2.1 Le rapport E/C :

Le rapport Eau/Ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte du ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau pour une très

faible masse de ciment (E/C élevé). Les grains de ciment seront donc très éloignés les uns des autres et, après être complètement hydratés, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité capillaire très importante. La perméabilité du mortier ou du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles. Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible). Les grains de ciment sont très proche les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire (figure I.3). La perméabilité du béton sera très faible et les propriétés du béton ou mortier seront très élevées, comme elles montrent les figures ci-dessous [1,2,4].

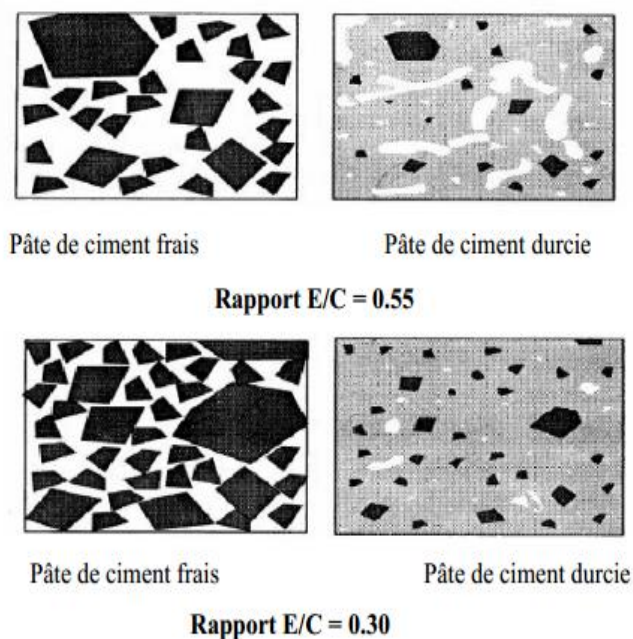


Figure I.3 : représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et durci[16]

De plus, le rapport E/C influe sur la structure porosimétrique de la pâte de ciment ou de mortier; comme il indique la courbe de la figure (I.4) : à l'âge de 28 jours, les gros capillaires de dimension supérieure à 100 nm ne subsistent plus que dans les pâtes gâchées avec les rapports E/C supérieure à 0.50. Les courbes cumulées mettent en évidence:

- La diminution de la porosité ouverte avec le rapport E/C.
- La diminution de la taille maximale des pores avec le rapport E/C.

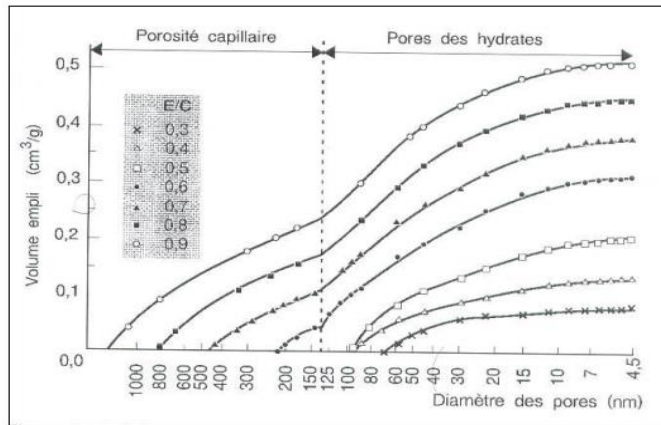


Figure I.4 : influence de rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de la pâte de ciment portland[16]

Le mode de cure :

C'est la procédure utilisée pour maintenir le mortier ou le béton au cours de la formation de son structure (réaction d'hydratation) dans des conditions convenables (humidité, température) pour protéger le développement correct de ses propriétés physico-mécaniques. Le manque de cure peut engendrer une diminution de la résistance et une augmentation de sa perméabilité [1,2,4,6,7,8,9,10]. La cure peut être réalisée par différents procédés parmi lesquels:

• Cure d'humidification par:

- o Immersion ;
- o Mise en atmosphère saturée ;
- o Arrosage mécanique homogène ;

• Cure de protection temporaire de l'imperméabilité par :

- Maintien des coffrages pendant la durée de cure ;
- Mise en place de bâches étanches maintenues en contact avec la surface à traiter ;
- Application de produits de cure qui sont à base de résine cire paraffine dissoute dans des produits pétroliers. Une cure efficace permet une hydratation uniforme du ciment, une réduction de la tendance de la pâte de ciment à se fissurer et elle lui offre une surface résistante aux intempéries et à l'abrasion.

• Cure chaude:

L'exposition des matériaux cimentaires (mortiers ou bétons) à l'effet de température ambiante ou artificielle (dans l'étude jusqu'à 105°C) pour étudier le comportement de ces matériaux dans le climat chaud et aride.

I.6 Transfert d'humidité dans les Matériaux cimentaires :

I.6.1 Conséquences de l'humidité sur la performance mécanique et thermique d'un matériau de construction :

La plupart des matériaux de construction sont poreux, une partie ou la totalité des pores sont interconnectés, cette particularité les rend aptes à fixer l'humidité et, par voie de conséquence, les expose à des modifications de leurs caractéristiques physiques, notamment, du point de vue mécanique et thermique. En effet, la migration de l'eau engendre une chute dans la résistance mécanique et une augmentation de la conductivité thermique des matériaux de construction [11,12]. La figure (I.5) exprime l'influence de la teneur en humidité sur la conductivité thermique de certains matériaux de construction.

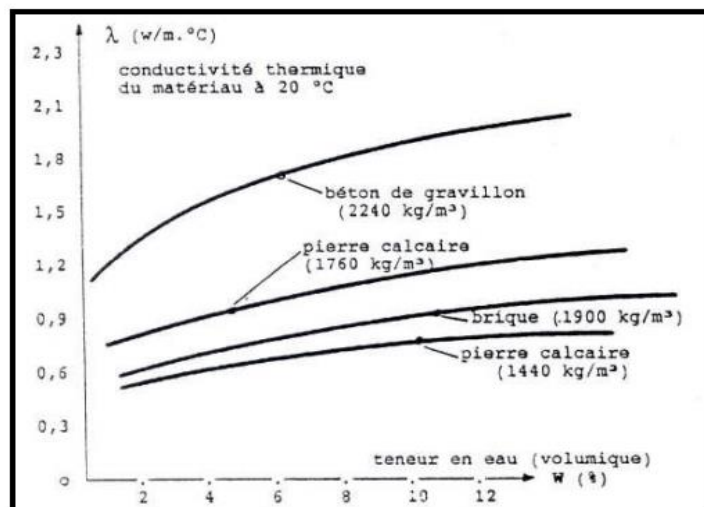


Figure I.5 : influence d'humidité sur la conductivité thermique de certains matériaux de construction [16]

L'humidité est la base de nombreux désordres (gonflement, retrait, fissuration, pollution, carbonatation, lessivage, gel/ dégel, ...) qui entraînent un vieillissement et une dégradation plus ou moins rapide des matériaux de construction, comme le montre les photos (I.1 et I.2).



Figure I.6 :Deteration de lenveloppe inferieure dun batiment par leffet dhumudite ambiant[16]

I.7 Les différents mécanismes de pénétration de l'humidité à l'intérieur d'un matériau poreux :

Il est y de nombreux phénomènes physiques et chimiques qui peuvent agir isolement ou simultanément permettant à l'humidité de pénétrer puis de se répandre dans les matériaux de construction [8,13], parmi ces mécanismes :

I.7.1 La gravité :

Depuis Newton, tout le monde sait que les corps subissent l'attraction de la terre. Cette attraction terrestre s'exerce, bien évidemment, sur les gouttes d'eau déposées à la surface d'un élément de construction et c'est elle qui va leur permettre de pénétrer à l'intérieur de la construction, pour peu toutefois qu'elles rencontrent à cet effet quelques passages. Mais, cette pénétration ne pourra s'effectuer qu'à condition que ces passages présentent une dimension suffisante que l'on peut évaluer à 0.5mm (figure I.6). En deçà, sous l'effet des tensions s'exerçant à la surface des gouttes, celle-ci « n'éclateront » pas et ne se répandront pas à l'intérieur des matériaux (figure I.7) [13].

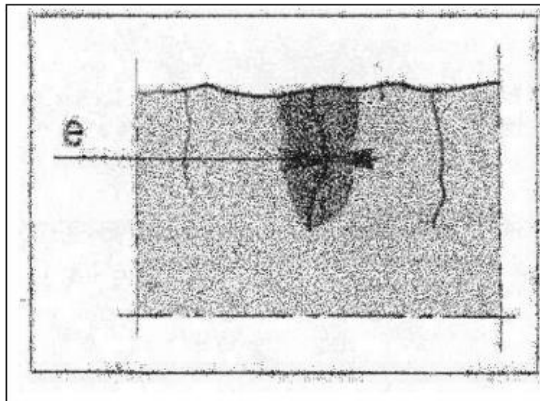


Figure I.7: la goutte deau penetre materiau

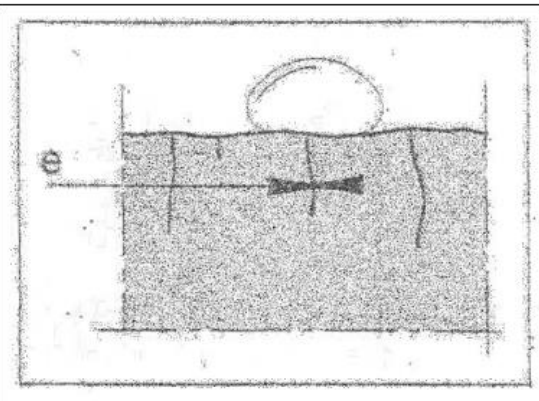
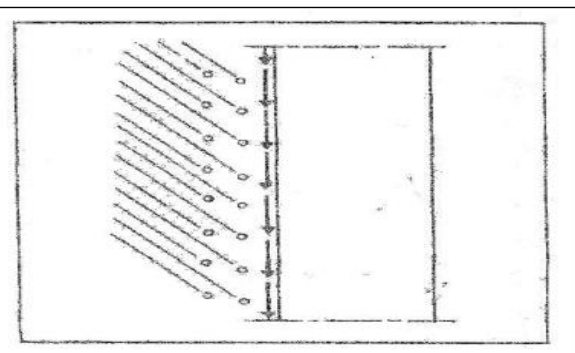
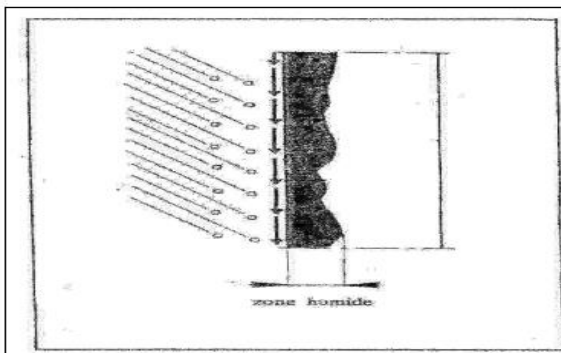


Figure I.8: la goutte deau ne pénètre pas dans le penetre pas dans le materiau

L'énergie cinétique des gouttes d'eau :

Transportées par le vent, les gouttes de pluie peuvent dans leur trajet avoir emmagasiné une énergie suffisante pour pénétrer à l'intérieur de la paroi contre laquelle elles sont projetées. Notons toutefois que cela ne se produira que si ces gouttes rencontrent une ouverture de largeur suffisante, que l'on peut estimer de l'ordre de 4 à 5 mm figure (I.8). En deçà de cette largeur, les gouttes ruisselleront à la surface de la paroi contre laquelle elles se seront écrasées mais sans y pénétrer figure (I.9) [13].

Figure I.9: si la pluire rencontre des fissures de largeur [13]



suffisant[13]

Figure I.10: si la pluirene rencontre pas des fissures largeur

1.7.1.1 La pression du vent :

Lorsque la pluie atteint en abondance une paroi constituée d'un matériau peu perméable, par exemple un enduit à base de liant hydraulique, elle finit par ruisseler à la surface de cette paroi (figure I.10). En l'absence de vent, le film d'eau de ruissellement franchit les fissures éventuelles des parements sans pénétrer dans la paroi. A l'inverse, lorsque le vent s'exerce sur le film de ruissellement, l'eau parvient à pénétrer dans les fissures éventuelles du parement, cela se produit même si ces fissures sont très fines : à partir de 0.1mm d'ouverture (Figure I.11) [13,14].

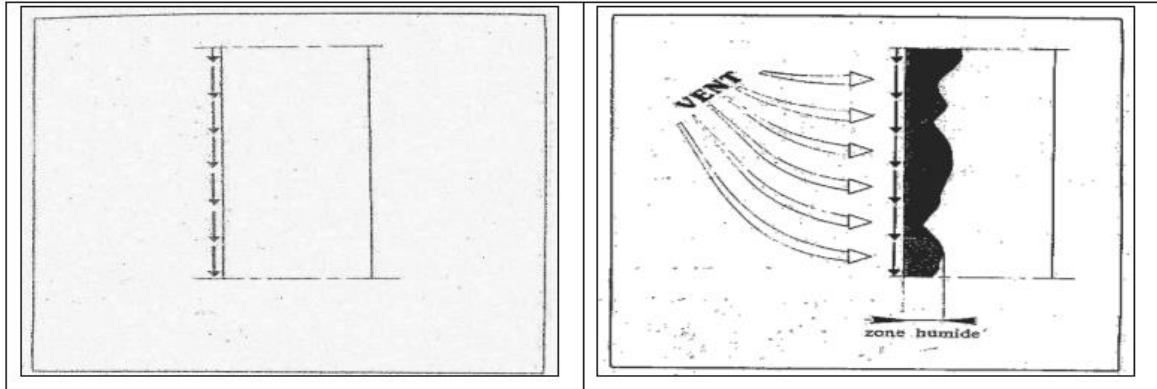


Figure I.11: en l'absence de vent, l'eau de pluie ruissle à la surface de la paro et du paremet [13]

I.8 Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'humidité dans un Matériau de construction :

D'une manière générale, la fixation de l'humidité dans les milieux poreux résulte de l'action plus ou moins conjointe de deux mécanismes physiques fondamentaux :

I.8.1 Adsorption physique :

C'est le résultat de l'interaction entre la vapeur d'eau dans l'ambiance et la surface solide en contact. Les forces de contact mutuelles qui s'exercent entre les particules de vapeur d'eau et les particules du solide en surface (forces de Van Der Waals) permettent aux molécules d'eau de se fixer sur la paroi du solide. Plus l'humidité relative de l'ambiance est élevée, plus la quantité d'eau adsorbée est importante. Ce processus est généralement modélisé par une courbe reliant la masse d'eau adsorbée à l'humidité relative appelée isotherme de sorption et désorption [14,15,16].

I.8.2 La capillarité :

On désigne par le vocable "capillarité", le phénomène dans lequel dans un tube fin plongé dans un liquide mouillant, le niveau du liquide s'élève plus haut qu'à la surface libre extérieure. On démontre en physique que plus le tube est fin, plus le liquide s'élève (figure I.12). Or, les matériaux les plus couramment utilisés en construction sont poreux et les petits canaux internes qu'ils comportent jouent, lorsque la construction est mise en contact avec l'eau, le rôle de tubes capillaires qui permettent à cette eau de remonter dans les maçonneries. Ce phénomène physique est dû aux forces capillaires qui se manifestent entre les parois des pores et l'eau en contact. Plus le réseau poreux est fin, plus les forces capillaires sont grandes et plus la hauteur d'ascension est

importante [12,16]. Ce phénomène se constate effectivement pour tous les matériaux qui présentent des pores très fins (d'un diamètre inférieur à 0.5 mm).

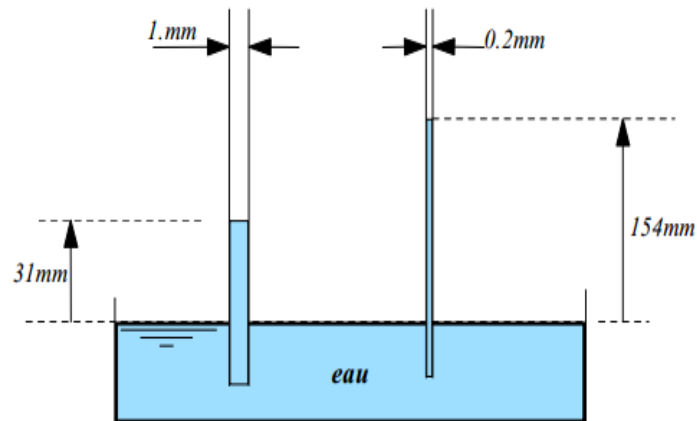


Figure I.12: Phénomène de capillarité : plus le tube est fine, plus le liquide s'élève plus Rapporté par Guelmine [13].

I.9 Description physiques d'un matériau poreux :

I.9.1 La phase solide :

Elle est constituée par des grains ou squelette poreux. Il est supposé que cette phase est invariante au cours du temps (indéformable). Elle est caractérisée par sa masse M_s et son volume V_s .

I.9.2 La phase liquide :

Elle est constituée par l'eau libre ou adsorbée, elle occupe partiellement les vides de la phase solide. Elle est caractérisée par sa masse M_l et son volume V_l . Cette phase peut être définie par l'un des paramètres suivants :

➤ **La teneur en eau massique ω :**

En considérant généralement que la teneur en eau vapeur est négligeable devant la teneur en eau liquide.

➤ **La teneur en eau volumique θ :**

C'est le volume occupé par l'eau condensé par l'unité de volume du milieu étudié.

I.9.3 La phase gazeuse :

Elle occupe l'espace libre. Elle est constituée par un mélange d'air et de vapeur d'eau, est caractérisée par sa masse M_g et son volume V_g . Le volume total occupé par la phase liquide et la phase gazeuse définit le volume des vides V_v .

I.10 Modélisation du transfert d'humidité dans un matériau poreux :

Pour décrire le transfert d'humidité dans un milieu poreux, de nombreux modèles ont été développés depuis les années cinquante : F.P. Glaser [9], A.V. Luikov (1966) [17], J.R. Philip et D.A. De Vries (1957) [18] et D.A. De Vries (1987) [19],...etc. Ces modèles phénoménologiques sont basés physiquement sur la généralisation de la loi de Darcy (pour l'écoulement liquide) et sur l'extension aux milieux poreux de la loi de Fick (pour la diffusion gazeuse), et s'inspirent mathématiquement directement des méthodes classiques de la mécanique des milieux continus. En raison de la complexité de l'espace poreux, cette approche ne peut toutefois être mise en pratique qu'après un changement d'échelle dont l'étape essentielle consiste à définir un volume élémentaire de référence (VER) qui traduit ce changement d'échelle. Les variables locales sont identifiées par des valeurs moyennes sur le (VER). Cette modélisation est établie dans sa forme actuelle, respectivement par J.R. Philip et D.A. De Vries [18,19] et A.V. Luikov [17]. Le système d'équations obtenu par ces auteurs, bien que similaire au point de vue formulation, il diffère uniquement dans le choix de la variable caractéristique de l'humidité. Ce modèle est établi en adoptant certaines hypothèses simplificatrices :

- le milieu poreux est assimilé à un milieu continu fictif (MCF) dont les dimensions sont grandes par rapport aux dimensions des pores.
- les différentes phases solides, liquides et gazeuses du milieu poreux non saturé sont supposées en équilibre thermodynamique en tous points du MCF équivalent.
- la phase solide est supposée homogène, isotrope et indéformable, sans réaction chimique avec l'humidité et avec des propriétés thermodynamique indépendantes de la température.
- les différentes phases sont continues.
- la température est comprise entre 0°C et 100°C. o la pression totale de la phase gazeuse (pression atmosphérique) est uniforme et constante. o la phase gazeuse obéit à la loi des gazes parfaites.

Le modèle mathématique de transfert d'humidité s'inspire directement de l'équation de conservation de la masse ou de continuité et les expressions des flux d'humidité en question. En substituant les expressions de flux de masse dans l'équation de continuité et après quelques manipulations mathématiques, on aboutit à l'équation du modèle de D.A. De Vries [18]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [(D_\theta) \nabla \theta_l + (D_T) \nabla T] - \frac{\partial K}{\partial z} \dots\dots\dots(I.1)$$

Où $\theta = \theta_l + \theta_v$; θ_l est la teneur en eau volumique totale et :

$$D_\theta = D_{\theta_v} + D_{\theta_l}; D_T = D_{T_v} + D_{T_l} \dots\dots\dots(I.2)$$

D_θ et D_T représentent les diffusivités hydriques isotherme et non isotherme du matériau poreux.

Le terme $\frac{\partial K}{\partial z}$ représente l'effet de la pesanteur sur le transfert d'humidité

Pour étudier le comportement d'une paroi, d'un ensemble de paroi, ou d'un bâtiment vis-à-vis du transport d'humidité, il faut résoudre l'équation relative au transport d'humidité (I.2). Les fonctions de l'espace et du temps à déterminer sont donc la teneur en humidité $\theta(x, y, z, t)$. Généralement, l'effet gravitationnel est négligeable devant la succion capillaire et l'équation de transfert de masse se réduit à l'équation ci-dessous : De plus, si le transfert se fait dans des conditions isothermes, l'équation de transfert d'humidité se simplifie à la forme la plus employée dans les études expérimentales pour un transfert unidirectionnel (figure I.14), l'équation (I.3) s'écrit :

$$\frac{\partial \theta_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(I.3)$$

D_θ est le paramètre de transfert hydrique appelé diffusivité hydrique exprimé en (m²/s)

Où : $t(s)$ est le temps, $z(m)$ la coordonnée spatiale. Les conditions initiales et aux limites pour cet essai sont:

- Condition au limite: à $z = 0$ et pour $t \geq 0$, $\theta = \theta_s$
- Condition initiale: à $t = 0$ et pour $z > 0$, $\theta = \theta_0$

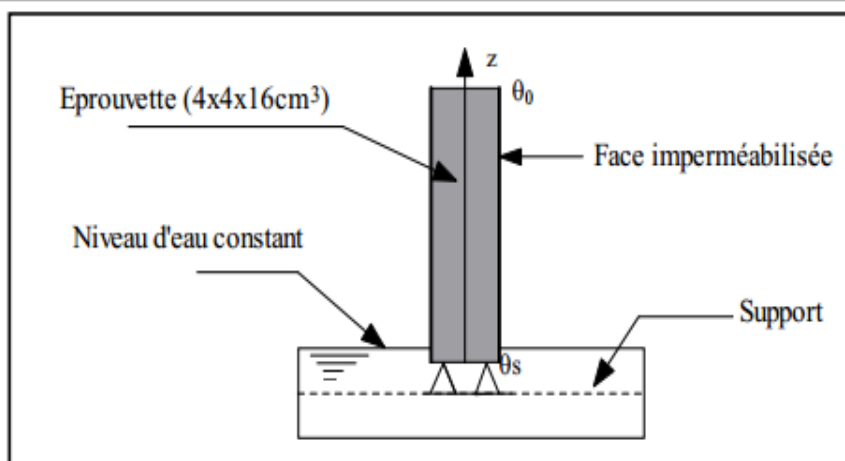


Figure I. 13 : Schéma de l'essai d'imbibition capillaire unidirectionnel[32]

En général, la diffusivité hydrique est déterminé par le tracé des profils hydriques $\theta(z,t)$ caractérisant l'évolution de la teneur en eau à travers l'échantillon dans l'espace et dans le temps. L'utilisation de la transformée de Boltzmann ($b = z \cdot t^{1/2}$) permet de regrouper l'ensemble des profils hydriques en une courbe unique appelée profil type $\theta(b)$ solution de l'équation différentielle (I.3) après transformation, soit :

$$-\frac{b}{2} \left(\frac{d\theta}{db} \right) = \frac{d}{db} \left(D_{\theta} \frac{d\theta}{db} \right) \dots\dots\dots(I.4)$$

Avec : $\theta = \theta_0$ lorsque $b \rightarrow \infty$ Le coefficient de transport capillaire à une teneur en eau θ est déterminé par intégration de l'équation (I.4) ce qui donne :

$$D_{\theta} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\left(\frac{d\theta}{db} \right)_\theta} \int_{\theta_0}^{\theta} b \cdot d\theta \dots\dots\dots(I.5)$$

La pente $\left(\frac{d\theta}{db} \right)_\theta$ et l'aire $\left(\int_{\theta_0}^{\theta} b \cdot d\theta \right)$ peuvent être déterminées expérimentalement à partir du profil

Le profil de type $\theta(b)$ est obtenu par la transformation des profils spatio-temporels $\theta(z,t)$ en un seul profile par l'utilisation de la transformée de Boltzmann. L'équation (I.2) donne la relation de la diffusivité hydrique globale, donc cette dernière est la somme des diffusivités en phase vapeur et en phase liquide. Philip et D.A. De Vries [16,18] donnent un schéma (figure I.14) de l'évolution de la diffusivité hydrique en fonction de la teneur en eau volumique. La figure (I.15) représente l'évolution de la diffusivité hydrique d'un mortier de ciment en fonction de la teneur en eau volumique et la température ambiante de l'essai.

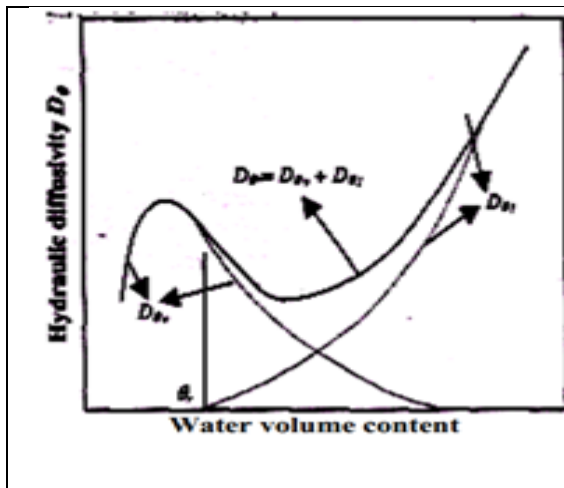


Figure I.14: Evolution de la diffusivité hydrique d'un matériau en fonction de la teneur en eau volumique [18,19].

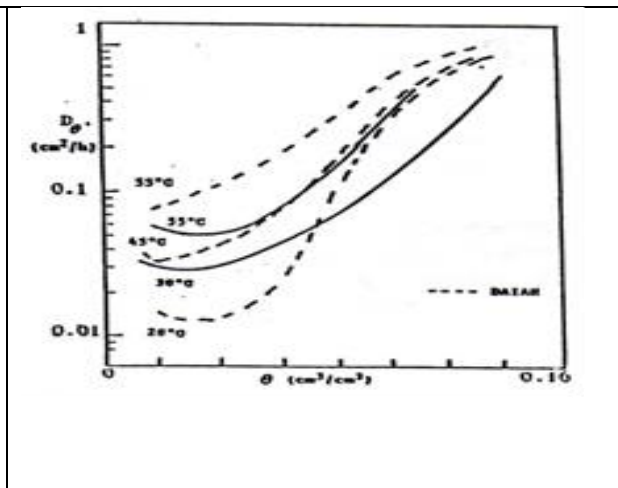


Figure I.15 : Evolution de la diffusivité hydrique de mortier de ciment en fonction de la teneur en eau volumique avec différentes températures d'après Merouani [20]

La difficulté dans la détermination de la diffusivité hydrique est d'évaluer les coefficients de diffusion au voisinage des teneurs en eau les plus faibles ou les plus élevées. Dans le domaine des teneurs en eau plus faibles, ce sont les transferts en phase vapeur qui sont prépondérants, par contre le transfert en phase liquide est dominant pour les teneurs en eau élevées [18]. Il est possible de déterminer le coefficient D_{0l} par l'imbibition sous phase liquide en mettant tout simplement en contact avec une nappe d'eau les échantillons du matériau étudié (figure I.13). Le suivi des profils hydriques dans l'espace et dans le temps permet d'évaluer la diffusivité hydrique en phase liquide.

Dans ce travail la diffusivité hydrique a été déterminée en utilisant l'essai d'imbibition capillaire. La diffusivité hydrique de la phase vapeur est pratiquement nulle et $D_{0v}=D_{0l}$. Le gradient de pression dans ce cas est celui de la pression capillaire ∇P_c , et la diffusivité hydrique se confond avec le coefficient de transport capillaire.

I.11 Les déchets industriels :

I.11.1 Définition

Les déchets industriels sont typiquement les déchets générés par les entreprises appartenant à différents secteurs d'activités économiques tels que les industries manufacturières, la construction, les services et l'agriculture.

Pour les industriels, le caractère de déchet est bien souvent lié à une valeur commerciale nulle ou négative, le déchet à valeur commerciale positive n'étant plus considéré comme déchet, ce qui induit une perception différente de celle des autorités compétentes.

La diversité des origines explique la nature et les caractéristiques très diverses des déchets qui constituent ce gisement. Ils peuvent être soit dangereux, soit non dangereux ou encore inertes. Cette diversité induit une multiplicité dans les traitements susceptibles d'être appliqués. [21,22]

I.11.2 Les types de déchets industriels :

Une typologie des déchets a été mise en place par l'Union européenne à partir de nature des déchets, leur origine ou leur mode de collecte et de traitement dans des centres appropriés, en vue de réduire au maximum leur impact sur l'environnement et sur l'homme. Sans ce tri sélectif, leur revalorisation est compromise. En fonction de leur nature, il est possible de classer les déchets en trois grandes catégories : les déchets dangereux, les non-dangereux, les inertes.

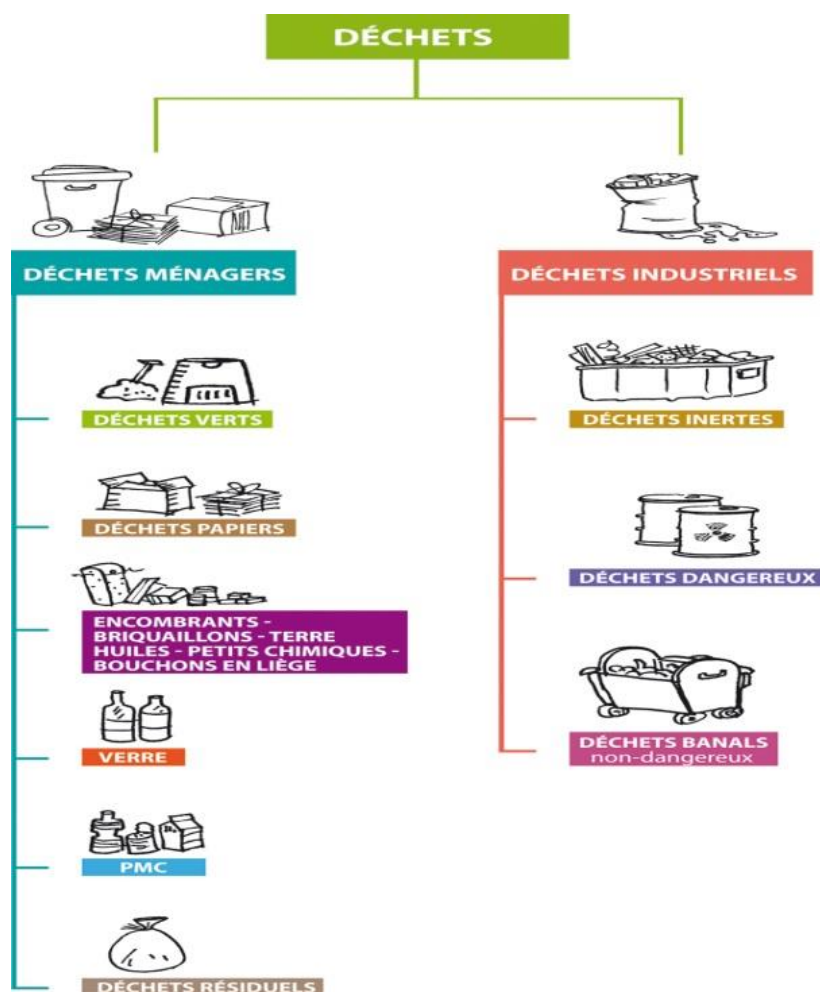


Figure I.15 : les différents types des déchets[32]

1.11.2.1 Les déchets dangereux

Les premiers sont considérés dangereux en raison du fait qu'ils contiennent des éléments toxiques pouvant avoir des répercussions graves sur l'environnement et la santé publique. Ce sont des déchets organiques de type solvant ou des hydrocarbures, ou bien minéraux comme les boues ou les acides, ou enfin gazeux. Pour bien les distinguer entre eux, trois sous-catégories parmi celle des déchets dangereux peuvent être établies telles que :

- Les déchets industriels spéciaux : chimiques, radioactifs, biologiques, d'origine industrielle, présentent un véritable danger pour l'environnement et les hommes. Ces déchets de haute dangerosité ou toxiques doivent être traités à part et via une filière différente de celle du traitement des déchets non-dangereux.

- Les déchets ménagers spéciaux : Ce sont tous les produits pouvant être explosifs comme les bombes aérosols, corrosifs tels que les acides, irritables comme l'ammoniaque ou inflammables. Tous ces produits sont dangereux, car ils présentent un danger pour l'environnement et la santé [21,22].

1.11.2.2 Les déchets non-dangereux (banals)

Les déchets non-dangereux sont dits aussi banals et ne présentent donc aucune dangerosité caractérisée selon l'annexe I de l'article R 541-8 du Code de l'environnement. Ni toxiques, ni corrosifs ou explosifs, ces déchets sont souvent assimilés aux ordures ménagères, car ils ont la même nature et sont donc traités et éliminés de la même manière que les simples ordures. Pour exemple, nous pouvons citer les matières plastiques telles que le PVC ou le polystyrène, les bois qui ne sont pas traités, cartons ou les emballages non souillés [23]

1.11.2.3 Les déchets inertes

Un déchet inerte correspond à : à un déchet ni toxiques, ni corrosifs ou explosifs, ces déchets sont souvent assimilés aux ordures ménagères, car ils ont la même nature et sont donc traités et éliminés de la même manière que les simples ordures [24]

« Des déchets peuvent être considérés comme inertes sans qu'il soit procédé à des essais spécifiques dès lors qu'il peut être démontré à l'autorité compétente, sur la base des informations existantes ou de procédures ou schémas validés, que les critères définis au paragraphe 1 ont été pris en compte de façon satisfaisante et qu'ils sont respectés » [25]

I.11.2.4 Les Déchets Toxique en Quantité Dispersée (DTQD) :

Ils sont de même nature que les déchets dangereux, mais ils ont la particularité d'être produits en faible quantité et répartis de façon non homogène sur le territoire. Ils proviennent essentiellement de l'activité des artisans et des petites entreprises



Figure I..16. Quelques exemples des déchets dangereux[32]

I.12 Les modes de gestion des déchets plastique :

En Algérie, l'accumulation des déchets, constitue une source potentielle des problèmes environnementaux et économiques majeurs. En effet, l'utilisation des produits industriels, de différentes catégories, génère des quantités importantes de déchets qui ne bénéficient à aucune action de valorisation. Ils sont très souvent entreposés dans des décharges non contrôlées polluant de l'environnement, au travers leur incinération à l'air libre ou encore, leur enfouissement. En Europe, ces modes de gestion des déchets sont totalement décriés et la réglementation actuelle impose une gestion écologique pour protéger la nature et l'environnement [26, 27,28]. Cette situation de non maîtrisées déchets industriels provoque

D'apparition de plusieurs pratiques :

- le brûlage des déchets en pleine air ou dans des chaudières à bois.
- le mélange des déchets de différentes catégories.
- la mise en décharge sauvage.
- Le stockage non approprié.

CHAPITRE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIE

En matière de gestion des déchets, deux filières existent et proposent :

- soit, des procédés de valorisation ;
- soit, des techniques d'élimination pure et simple des déchets.

Divers types des matières recyclables d'origine industrielle sont actuellement utilisées dans les applications de génie civil telles que : les particules de déchets polymériques (caoutchouc, le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène téréphtalate PET, les fibres de PET, le polyéthylène à haute densité PEHD, la mousse du polyuréthane rigide PUR ...etc.), la céramique, le polystyrène expansé PS, le bois, le verre, le liège, les fibres d'acier, les coproduits issus de l'exploitation agricole (lin, olive, coquille de riz, jute, fibre de palmier...etc.). Chacun de ces déchets a donné un effet spécifique sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci [21,22,23] .

L'utilisation des matériaux plastiques dans le mortier et le béton a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans le passé, les plastiques étaient principalement utilisés dans le béton sous deux formes: (1) les granulats plastiques, qui remplaçaient les granulats naturels et (2) les fibres plastiques, utilisés dans le béton fibré. Par ailleurs, les matériaux de construction traditionnels d'origine naturelle sont confrontés, à terme, à l'épuisement. Il est donc important de penser à l'élaboration de matériaux composites à base des agrégats légers provenant des déchets industriels et agricoles [21,22,23].

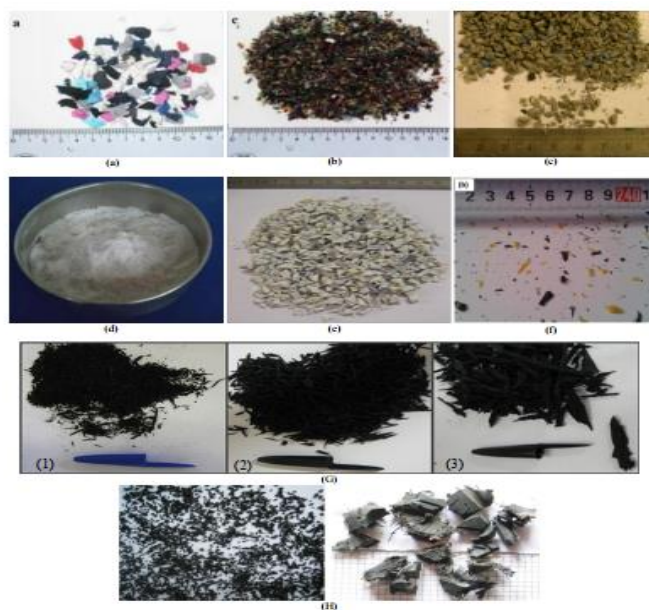


Figure I.17: Type des agrégats plastiques utilisés dans le béton / mortier [32]

(a) Ethylène acétate de vinyle - (EVA) (4/8 mm), (b) Câbles en polychlorure de vinyle (PVC) (0/4mm), (c) Tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) (<5 mm), (d) Polyéthylène téréphtalate (PET) (<1mm), (e) Polycarbonate (PC) (<5mm), (f) Polyéthylène à haute densité (PEHD), (G) Caoutchouc pneumatique (SBR) (1)- (1/2 mm) (2)-(2/4 mm) (3)-(4/8 mm),(H) Caoutchouc pneumatique – à gauche (agrégats) / à droite (déchets)

I.13 Valorisation des déchets plastiques dans le domaine de Génie Civil :

À la lumière de l'épuisement effrayant des ressources naturelles de la planète, le besoin est apparu de nombreuses techniques qui réduisent l'utilisation de ces ressources ou sont réutilisées ou recyclées en d'autres matériaux pouvant être utilisés dans le même domaine d'où ils ont été extraits ou dans un autre domaine. Il a été démontré que les résultats obtenus par le processus de recyclage des déchets ne se limitent pas à réduire sa taille et à maîtriser le problème, mais plutôt à le dépasser pour obtenir des avantages économiques et des opportunités précieuses pour l'économie, comme contribuer à la création d'emplois dans le domaine du travail [23,24,25,26,27].

La valorisation des déchets de génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des normes de qualité très strictes. Le recyclage des déchets a deux impacts importants : l'impact économique et l'impact. Même dans de nombreux pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le domaine de la construction, en particulier dans le ciment ou le béton comme la poudre, la fibre ou les granulats.

Il est clair que cette approche est de développer et de soutenir l'utilisation de ces déchets industriels dans divers ouvrages de génie civil qui, d'une part, contribueront à la préservation de l'environnement, et d'autre part, réduiront les coûts induits par l'utilisation de matériaux de plus en plus rares, notamment dans certaines régions du pays.

I.14 l'effet des granulats de plastique sur les propriétés des matériaux cimentaires

Dans la littérature, il y a plusieurs études qui ont été évaluées les effets de l'inclusion des granulats de plastique recyclés sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires [25,26,27]

I.14.1 L'ouvrabilité :

Les études conduites par Batayneh et al. [28] ont rapporté que la matrice préparée par le remplacement de 20% d'agrégats fins par du plastique affecte la maniabilité jusqu'à 25%. D'autre part, dans quelques études une augmentation de la valeur de l'affaissement due à l'incorporation des granulats en plastique est également observée [29, 30]. L'augmentation de l'affaissement de béton en raison de l'incorporation des agrégats plastiques est due à la présence d'une quantité importante de l'eau libre dans les mélanges contenant du plastique que dans le mélange de béton

contenant des agrégats naturels, donc à la différence des granulats naturels, les agrégats en plastique ne peuvent pas absorber de l'eau lors du gâchage . En outre, Senthil et al. [31] ont étudié les effets de l'ajout des déchets des pièces électroniques (E-plastique) sur la maniabilité du béton. Des E-plastiques ayant des proportions de 10,20,30, 40 et 50 % ont été utilisés. Ils ont montré que la maniabilité du béton a diminué jusqu'à un rapport d'aspect de 50% (Figure I.12).

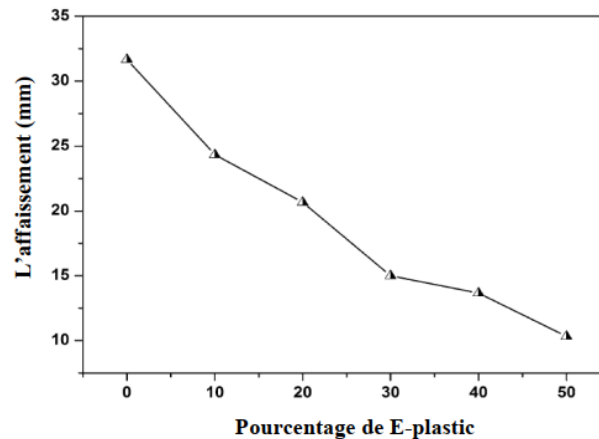


Figure I.18: Etalement du béton en fonction du pourcentage de E-plastic [31]

I.14.2 Résistance en compression :

La résistance à la compression du béton et du mortier est une propriété de base qui a été vue en détails dans presque tous les travaux de recherches concernant les agrégats en plastique. Il a été constaté que l'incorporation des agrégats plastique a diminuée la résistance à la compression du béton / mortier résultant. La figure I.21 montre quelques résultats à 28 jours de la performance des résistances à la compression du béton/mortier contenant des déchets plastiques par la substitution partielle des agrégats naturels.

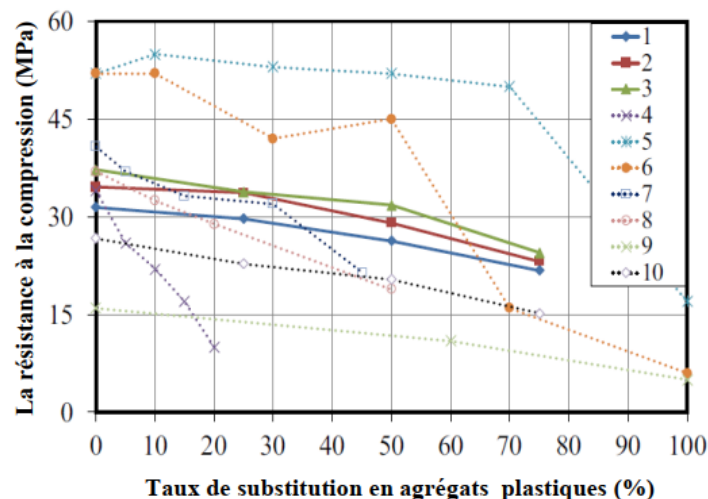


Figure I.19: La variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [28]

I.14. Résistance à la flexion

De manière similaire au comportement de la résistance à la compression, les résultats présentés sur (la figure I.22), montre que l'incorporation de tel type d'agrégat plastique abaisse la résistance à la traction par flexion du béton/mortier.

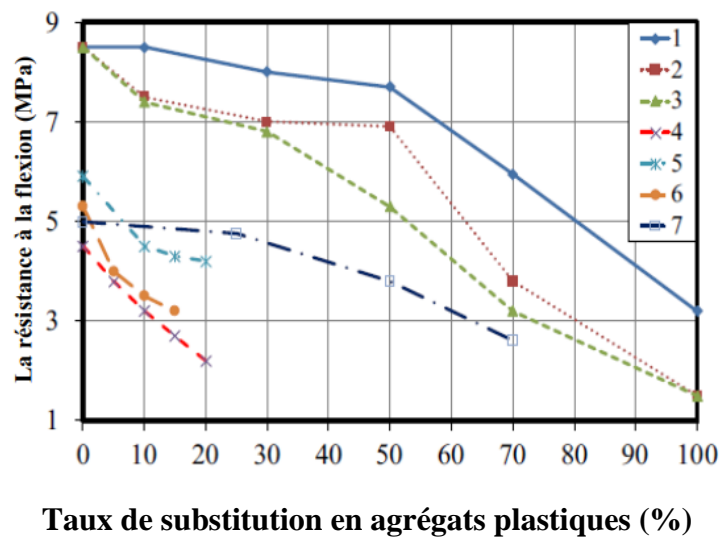


Figure I.20: La variation de la résistance à la flexion en fonction du pourcentage des agrégats plastiques à 28 jours [2]

Sorptivité :

Un programme expérimental a été réalisé par Senthil et al. [31] pour étudier les propriétés de transfert du béton préparé avec des déchets des pièces électroniques E-plastique (polystyrène à fort impact HIPS). Le béton a été préparé avec différents pourcentages (0,10,20, 30, 40 et 50%) de HIPS en remplacement partiel des agrégats grossiers naturels en volume. Leurs résultats ont révélé que les valeurs de la sorptivité ont augmenté avec l'augmentation de la teneur en HIPS; toutes les valeurs étaient supérieures au béton témoin.

Cependant, elles ont diminué avec l'augmentation de l'âge.

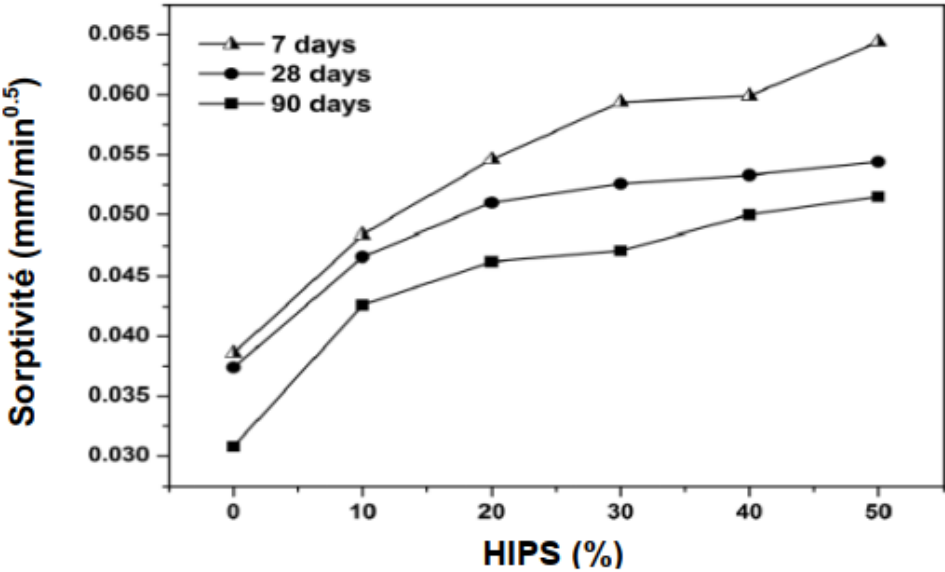


Figure I.21: Coefficients de la sorptivité du béton à différents volumes de granulats HIPS [31].

Chapitre II : matériaux et méthodes expérimentales

II.1 Introduction

L'objectif principal de cette étude, est l'étude de l'effet de l'inclusion des granulats de plastique recyclés GPR, sur les propriétés physiques et mécaniques des mortier de ciment. La première partie de ce chapitre concerne la caractérisation des matières premières, utilisées. La seconde partie présente à la composition, la préparation et la conservation des composites préparés. Par la suite, les différents protocoles expérimentales utilisés pour caractériser les mortiers préparés.¹

II.2 Caractirisation des matières premières :

Le terme méthode de Monte Carlo, qui sont des techniques probabilistes impliquant calcul d'une valeur numérique à l'aide de méthodes stochastiques, trouves son dans les jeux de hasard pratiqués à la ville de Monte-Carlo, ils ont été inventés par N. Metropolis (1) dans les années 40 dans un article publié pour la première fois en 1949. Les méthodes de Monte Carlo se sont avérées très efficaces pour résoudre de nombreux problèmes mathématiques en analyse numérique et en physique.

II.2.1 Essai sur le sable

II.2.1.1 Analyse granulométrique : NFP.18-560[21]

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et formes des granulats utilisés. On utilise une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par tamis est. La courbe qui relie le pourcentage des passants aux diamètres des tamis est appelée courbe granulométrique. A partir de l'analyse Granulométrique, certains coefficients de classification peuvent être déterminés :

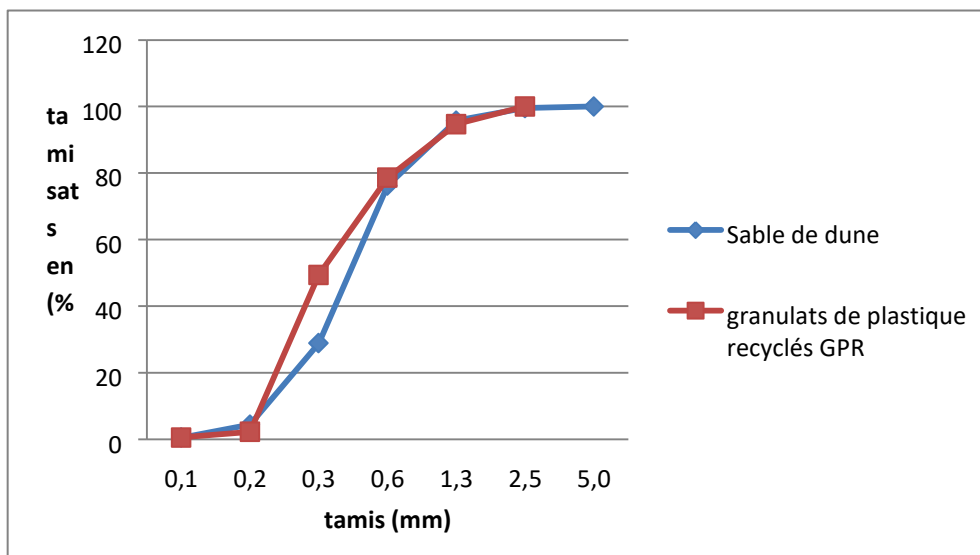


Figure II .1 : Analyse granulométrique

II.2.1.2 Module de finesse :

La finesse du sable étudié peut être quantifiée par le calcul du module de finesse M_f . celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis d'ouverture 0.08-0.16-0.315-0.63-1.25-2.5- et 3.15 le module de finesse représente, en quelque sorte, et de manière approchée, la surface comprise entre la courbe granulométrique et l'axe horizontale supérieure du graphe. Il est exprimé par la formule suivante :

$$M_f = \frac{[\sum \text{des refus des tamise (0.08;0.16;0.315;0.63;1.25;2.5;3.15)en(\%)]}{100} \quad (\text{II. 1})^2$$



figur II .2:Courbes Granulométriques des Granulats de plastique.

D'après la courbe granulométriques, on remarque que les granulats de plastique recyclés sont plus fins de les granulats de sable de dune.

Figure(II.1) : Courbes Granulométriques des Granulats utilisés.

D'après la courbe granulométriques, on remarque que les granulats de caoutchouc recyclés sont plus fins de les granulats de sable de dune.

II.2.1.3 Equivalent de sable NFB.18-598[21]

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable, il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de

Chapitre II : matériaux et méthodes expérimentales

la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat. Ce coefficient est déterminé conformément à la norme **NFP.18-598**. **ON** détermine la qualité des sables par les coefficients suivants :³



Figure II .3:Essai d'équivalent de sable.

L'équivalent du sable visuel : $E_{sv} = h'2/h1$ (II.2)

L'équivalent du sable par piston : $E_{sp} = h2/h1$ (II.3)

Avec :

$h2$, $h'1$: hauteur du sable propre seulement avec et sans piston ; $h1$: hauteur du sable + les éléments fins.

Tableau II.1 : Résultats d'essais d'équivalent de sable testé.

Essai	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E_{sv} (%)	E_{sv} (moy)
1	13.7	12.2	89.05	
2	12.5	11.3	90.4	90.35
3	13.1	12	91.6	
Essai	h_1 (cm)	h'_2 (cm)	E_{sp} (%)	E_{sp} (moy)
1	13.7	11.7	85.4	
2	12.5	10.9	87.2	85.77
3	13.1	11.1	1.2	

II.2.1.4 Masse volumique apparente et absolue

La masse volumique apparente et absolue des différents granulats est déterminés conformément à la norme **NFP 18-555[3]**.

- **Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente est le rapport de la masse d'échantillon sec M au volume total apparent V_t . Il s'agit de rempli un volume de 1 dm^3 et déterminer sa masse M par peser, soit :⁴



Figure II .4:Masse volumique apparente

- **La masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Pour déterminer celle-ci, on utilise la méthode de l'éprouvette graduée. Pour opérer dans de bonnes conditions, on utilise une éprouvette graduée en verre de 500 cm^3 . Le volume du liquide déplacé détermine le volume absolu V_s des grains solides.

$$\rho_s = M/V_s \quad (\text{II.4})$$

II.3.1 Compacité : NFP.18-555[21]

C'est le rapport du volume absolu V_s de la matière au volume total V_t . Elle est donnée par la formule suivante :

$$C = V_s / V_t \quad (\text{II.5})^5$$

II.3.2 Porosité : NFP.18-555[21]

C'est le rapport du volume des vides V_v au volume total V_t . Elle est donnée par la formule suivante ;⁶

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - C \quad (\text{II.9})$$

II.4 Essai sur le ciment :

II.4.1 Surface spécifique :

La surface spécifique de Blaine est la surface totale en cm^2 développée par 1g de, elle est mesurée conventionnellement selon la norme **NFP 15-476[21]**. La surface spécifique d'un liant est calculée en déterminer le temps que met un volume d'air constant, sous une pression déterminer et à la température connue, pour traverser une couche du liant Tassé. La surface spécifique de Blaine est calculée en utilisant l'expression suivante :

$$SSB = k \frac{\sqrt{e} \sqrt{t}}{\rho_s (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (\text{cm}^2 / \text{g}) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

t ; le temps de passage de l'air entre les deux traits en seconde ; k : la constante de l'appareil (ici égale à 43) ; e : la porosité de la couche tassée (égal à 0.5) ; ρ_s : la masse spécifique du ciment (g/cm^3) et η : la viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai.

II.4.2 Masse volumique absolue : NFP 18-558[21]

On détermine la masse spécifique d'un liant par le densimètre leChatelier. La masse spécifique peut être indice de la qualité du liant, en générale, sa valeur permet de déceler l'introduction des adjuvants ou des produits étrangers au liant la masse spécifique est la masse d'un liant par unité de volume de matière pleine, examine dans les conditions ambiantes (température, pression) constantes.

Afin de réaliser cet essai, il faut que le liant à analyse soit nettement pulvérisé en se servant du benzène ou d'une essence minérale n'ayant pas une action chimique sur le liant à analyser, la température doit rester constante pendant l'opération (18-20°C).

- On pèse 60g du liant ;
- On introduit cette quantité dans le densimètre lechatelier déjà rempli du benzène jusqu'à un niveau déterminé ;
- On introduit le densimètre dans un bain thermostatique à une température de (20±1°C) ;
- Lorsque le niveau du benzène devient stable on note le volume déplacé V ;
- On calcul la masse spécifique par la formule suivante. ⁷

$$\rho_s = \frac{M}{V_s} \text{(II.7)}$$

Où ; M est la masse du liant dans le densimètre.

II.4.2 Masse volumique apparente :

La densité apparente d'un matériau est le poids d'une unité de volume de matériau. Il s'exprime en kg/m³. A cet effet on se sert des équipements suivants :

- 1-un entonnoir ;
- 2- un récipient d'un litre de volume
- 3-une réglette ;
- 4-une balance précision 0.01g.⁸

➤ L'essai consiste à :⁹

- 1-Tarer le récipient M1 ;
 - 2-Remplir le récipient posé au- dessous de l'axe de l'entonnoir avec la poudre de ciment ;
 - 3- Faire l'opération sans vibration. Raser avec la réglette appuyée sue les borde de récipient ;
 - 4-nettoyer l'extérieur du récipient ;
 - 5-Peser de nouveau le récipient rempli, soit M2, sa masse
- La masse volumique apparente est calculer par :

$$\rho_{app} = \frac{M2-M1}{V} \quad \text{(II.8)}$$

II.4.3L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage remplit deux fonctions principales, d'une part, une fonction physique qui permet de conférer au mortier les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. L'eau de gâchage des mélanges de mortiers confectionnés est issue directement du robinet du réseau publique d'eau potable. Ces propriétés chimiques n'ont pas fait l'objet de la présence étude. Donc, elle est supposée propre et ne contenir aucune impureté nuisible conformément à la norme NF.18-303.

II.5 Propriétés rhéologiques du ciment

II.5.1 Consistance normale : NFP.15-573[21]

L'essai de consistance normale permet de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour fabriquer une pâte dite de consistance normale. La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement, dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. La lecture donnant l'épaisseur de la pâte restante entre l'extrémité inférieure de la sonde et le fond du moule, quand celle-ci cesse de s'enfoncer sous son propre poids de $(6 \pm 1\text{mm})$. On déterminer la quantité d'eau à laquelle la consistance normale est réalisée.

Le dispositif utilisé dans cet essai est l'appareil de Vicat. Il est composé essentiellement d'un piston vertical immobile, mené à son sommet d'un plateau destiné à recevoir une charge, et portant un curseur de déplacement devant une règle graduée, à sa partie aiguille, partie mobile avec la bande et l'aiguille pèse $300 \pm 1\text{g}$ avec une surcharge de $1000 \pm 1\text{g}$.

Chapitre II : matériaux et méthodes expérimentales

La préparation de la pâte consiste à verser dans le malaxeur la quantité d'eau préalablement déterminée par les tâtonnements successifs de manière à réaliser la consistance normale, lui ajouter 500g de ciment afin de remplir le moule tronconique. Avec la pâte ainsi préparée, on remplit le moule tronconique, qui est constitué d'un anneau

Reposant sur une plaque support puis araser avec une spatule en la déplaçant avec un mouvement de scie de faible amplitude sur une surface supérieure. Placer le moule tronconique contenant la pâte au niveau vertical de l'axe de la sonde et laisser descendre cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte, et immobiliser à son contact, puis abandonner à elle-même sans vitesse initiale. Procéder à la lecture de l'épaisseur de la pâte quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids de 6 ± 1 mm comptée à partir du fond.

II.5.2 Prise : NFP 15-573[21]

L'essai de prise a pour but de déterminer le temps de prise, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise et jusqu'à la fin de prise. On détermine le temps de prise à l'aide de l'aiguille de Vicat qui s'enfonce dans le moule tronconique rempli de pâte normale. L'essai de prise est déterminé par l'appareil de Vicat, sur une pâte de consistance normale. En effet, après avoir préparé la pâte normale, il faut remplir immédiatement le moule tronconique et araser la surface supérieure avec une spatule. Placer le moule rempli de la pâte sous l'aiguille ; laisser descendre cette dernière perpendiculairement à la surface et l'immobiliser à son contact, puis l'abandonner sans vitesse initiale.¹²

- **Le début de prise** : c'est l'instant où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à 2.5mm du fond du moule.¹³
- **La fin de prise** : c'est l'instant où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte.¹⁴

II.6 Etude du mortier frais :

II.6.1 Préparation des mortiers étudiés :

- Le malaxage de mortier a été réalisé à l'aide d'un malaxeur pour mortier muni d'un axe de rotation vertical. Celui-ci est effectué d'une façon identique pour tous les types de mortiers dans l'objectif d'obtenir une pâte homogène, nous avons suivi les étapes suivantes :
- L'eau est introduire en premier dans la cuve du malaxeur ; ensuite on y verse le ciment ;
- Aussitôt après mettre le malaxeur en marche à vitesse lente. Après 30s de malaxage on introduit régulièrement et de manière rapide le sable et continuer La malaxage 1min30s pendant les première 15 secondes, enlever au moyen d'une raclette en métal tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en repoussant vers le milieu de celui-ci. On reprendra ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s. Le mortier ainsi préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4*4*16cm³, ceux –ci subiront par la suite des chocs (2*60 coups) à l'aide d'une table à choc afin de dégager toutes les bulles d'air occlus lors de la mise en moule et d'homogénéiser la structure des éprouvettes préparées, après la fin de l'opération, on araser la partie du mortier en excès. Le démoulage se fait 24 heures après remplissage des moules. La conservation des éprouvettes s'effectuera dans l'ambiance du laboratoire à 20±2°C et HR=55±5% et dans l'eau pour subir une cure humide.



Figure II .5:malaxeur normalisé EN 196-1.

Tableau II.2 : Opération de malaxage des mortiers

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction du sable, faire le malaxage		Raclage de la cuve	Reprendre le malaxage	
			30 s	30 s		1mn	Durée
Durée			30 s	30 s	15 s	1mn	Durée

Chapitre II : matériaux et méthodes expérimentales

				15s	
Etat du ma ¹⁵ laxeur	Arrêt	Vitesse lente	Arrêt		Vitesse rapide



Figure II .6:Granulats de plastiques utilisés.

Tableau II.3 : Composition des mortiers préparés

type de mortier	granulat de plastique GPR(g)	sable (g)	ciment (g)	E/C	EAU DE ROBINET (g)	NOMBRE DE EBROVET
mortier témoin MT	0	1350	450	0.50	225	6
MGPR 4% M1	54	1296	450	0.50	225	6
MGPR 8% M2	108	1242	450	0.50	225	6
MGPR 12%M3	162	1188	450	0.50	225	6
MGPR 4%M4	54	1296	450	0.60	270	6
MGPR 8%M5	108	1242	450	0.60	270	6
MGPR 12%M6	162	1188	450	0.60	270	6

MGPR 4%M7	54	1296	450	0.70	315	6
MGPR 8%M8	108	1242	450	0.70	315	6
MGPR 12%M9	162	1188	450	0.70	315	6

Si préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4*4*16cm³, ceux-ci subiront par la suite des chocs (2*60coups) à l'aide d'une table à choc afin de dégager toutes les bulles d'air occluses lors de la mise en moule et d'homogénéiser la structure des éprouvettes préparés, après la fin de l'opération, on arase la partie du mortier en excès, le démoulage se fait 24 heures après remplissage des moules. Après démoulage, les éprouvettes préparées ont été conservés dans un bac l'eau de robinet durant 28 jours ($T= 20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=100\%$). Par la suite, les éprouvettes sont conservés dans l'environnement de laboratoire jusqu'au jour de l'essai ($T= 20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}= 40 \pm 5\%$). Les propriétés des éprouvettes exposées à l'acide sulfurique et le gel/dégel ont été évaluées en fin de chaque attaque puis comparés avec des spécimens de références. ¹⁶

II.7 Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :

II.7.1 Ouvrabilité :

Il s'agit de trouver une composition optimale permettant d'avoir une bonne cohésion entre les grains de la pâte de mortier, ainsi qu'une bonne mise en œuvre. La maniabilité du mortier est réalisée par l'essai l'étalement conformément à la norme **EN 459-2** :¹⁷



Figure II .7: Essai d'ouvrabilité

II.7.1.1 Mode opératoire

Chapitre II : matériaux et méthodes expérimentales

Préparer le mortier conformément à la norme **EN 196-1**. Si la table d'écoulement n'a pas fonctionné pendant l'heure précédant l'essai, la faire fonctionner à vide plusieurs fois. Nettoyer et sécher avec beaucoup d'attention le plateau de la table. Placer le moule tronconique au centre de la table à chocs (centrage à l'aide du cercle gravé sur le plateau). Remplir le moule en 2 couches. Chaque couche doit être étalée en la compactant légèrement 10 fois à l'aide de la tige de compactage (pilon en bois). Araser puis lisser. Nettoyer la table d'écoulement et essuyer toute trace d'eau à proximité du moule. Programmer le tableau de commandes : taper 1 fois sur la touche de sélection (des 0 apparaissent à l'écran) puis plusieurs fois pour atteindre la décimale des dizaines (celle-ci doit clignoter). Incrémenter pour rentrer le nombre 1 pour la dizaine.

Taper 1 fois sur la touche de sélection pour atteindre la décimale des unités (celle-ci doit clignoter). Incrémenter pour rentrer le nombre 5 pour l'unité. Taper 1 dernière fois sur la touche de sélection pour valider le nombre 15 seul le nombre 15 s'affiche à l'écran. Retirer le moule verticalement. Soumettre le mortier à 15 chocs à raison d'1 choc par seconde en appuyant sur la touche START. Evaluer la valeur de l'étalement dans 2 directions perpendiculaires, la moyenne de ces mesures donnée à 1mm près représente l'écoulement.

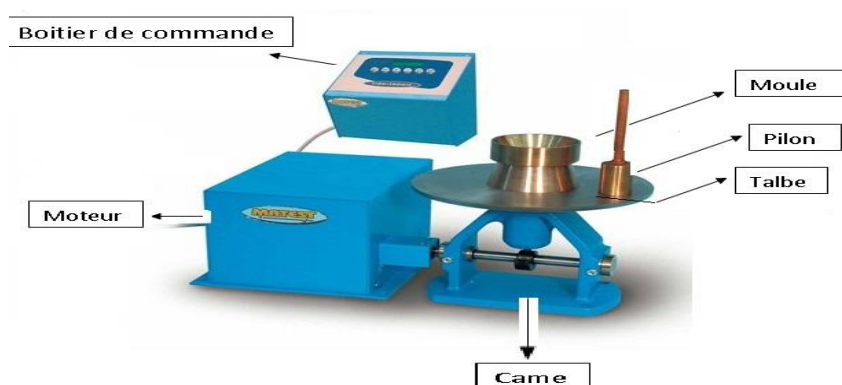


Figure II .8: table d'étalement.

II.8 Essai physico-mécaniques sur le mortier durci.

II.8.1 Propriétés physiques :

II.8.1.1 Porosité ouverte :

C'est la propriété d'un milieu poreux. Elle est obtenue par un essai d'immersion dans le potable sur des éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Les éprouvettes sont séchées pendant 24h à l'étuve à 105°C , puis, en émergeant dans un bac d'eau potable jusqu'à la stabilisation totale de la masse de l'éprouvette [9]. On calcule la porosité ouverte par la formule suivante :

$$P = \frac{m^{\text{sat}} - m^{\text{sec}}}{m^{\text{sec}}} \times 100 \quad (\text{II.9})$$

P : la porosité ouverte, accessible à l'eau.¹⁸

m^{sat} : la masse saturée.

m^{sec} : la masse sèche.

II.8.1.2 Masse volumique apparente :

Par définition, la masse volumique apparente sèche ρ_{app} est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent sec V_t . L'état sec est obtenu par séchage de l'échantillon en étuve à 105°C jusqu'à masse constante, les pesées sont effectuées à 0.1g près et les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec précision de 0.1mm. la masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de chaque composition.

II.8.1.3 La sorptivité :

Expérimentalement, la sorptivité est déterminée directement par une méthode gravimétrique en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La courbe d'évolution obtenue généralement une droite dont la pente exprime la sorptivité du matériau. La quantité d'eau absorbée est mesurée à des intervalles de temps par pesée avec une précision de 0.1g, le volume d'eau étant déduit connaissant la masse volumique de l'eau liquide (1g/cm³). Le taux d'absorption volumique par unité de surface i (m³/m²) à un instant

t, donnée a calculé par la formule suivante :

$$i = \frac{m(t) - m(0)}{A \rho_1} \quad (\text{II.10})$$

Où : ρ_1 est la masse volumique de l'eau liquide = 1g/cm³.¹⁹

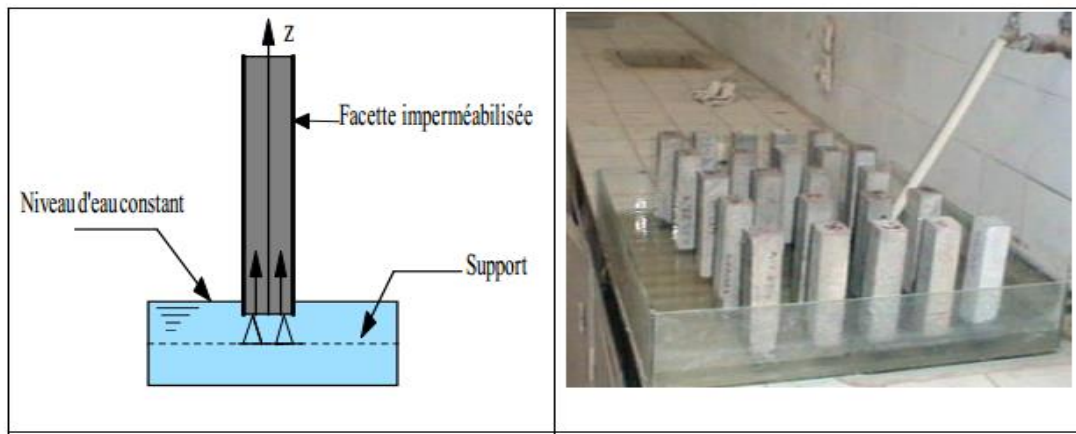


Figure II .9: Dispositif de mesure de la sorptivité par capillarité.

II.10 Propriétés Mécaniques :

II.10.1 Résistance à la flexion : norme EN196-[21]

L'essai consiste à estimer les résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortiers élaborés. Le dispositif de flexion (photo II.1) comporte deux appuis à section semi- cylindrique de 10mmde diamètre, distant de 100 ou 106.7mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique, un troisième appui de même diamètre, équidistant des deux premiers permet de transmettre la charge de rupture F (figure II.2). Afin d'avoir une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, les deux appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leur centres, dans le plan vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. La résistance à la flexion est calculée selon la formule :

$$R_f = \frac{3F_f L}{2b^3} \quad [\text{Pa}] \quad (\text{II.11})$$

Avec :

F : charge de rupture en (N) ;²⁰

B : largeur de l'éprouvette ;²¹

L : distance entre les appuie en m ;

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (II.3) et dans la photo (II.9).

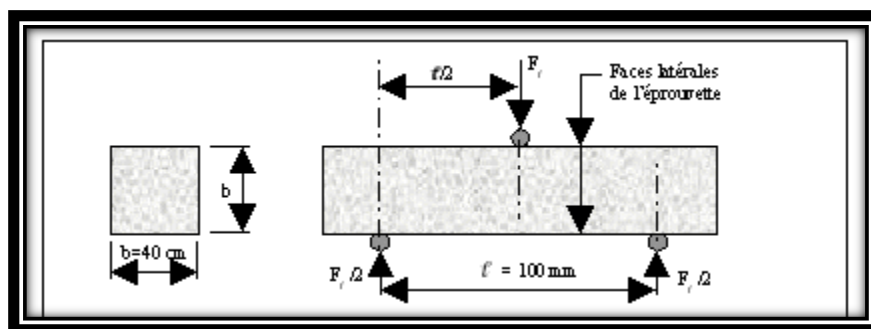


Figure II .10: Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion

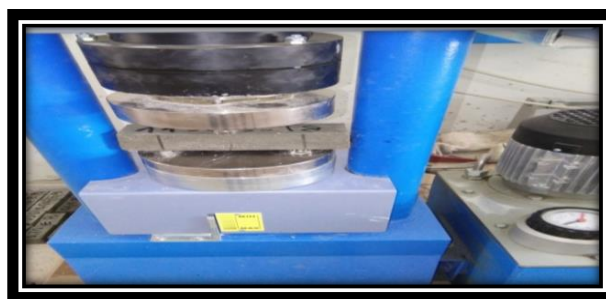


Figure II .11: Dispositif expérimental de l'essai de flexion

II.10.2 Propriétés Mécaniques :

II.10.2.1 Résistance à la flexion : norme EN196-[21]

L'essai consiste à estimer les résistances à la traction par flexion des éprouvettes de mortiers élaborés. Le dispositif de flexion (photo II.1) comporte deux appuis à section semi- cylindrique de 10mmde diamètre, distant de 100 ou 106.7mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique, un troisième appui de même diamètre, équidistant des deux premiers permet de transmettre la charge de rupture F (figure II.2). Afin d'avoir une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, les deux appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leur centres, dans le plan vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. La résistance à la flexion est calculée selon la formule :

$$R_f = \frac{3F_f L}{2b^3} \quad [\text{Pa}] \quad (\text{II.11})$$

Avec :

F : charge de rupture en (N) ;

B : largeur de l'éprouvette ;

L : distance entre les appuie en m ;

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure (II.3) et dans la photo (II.9).

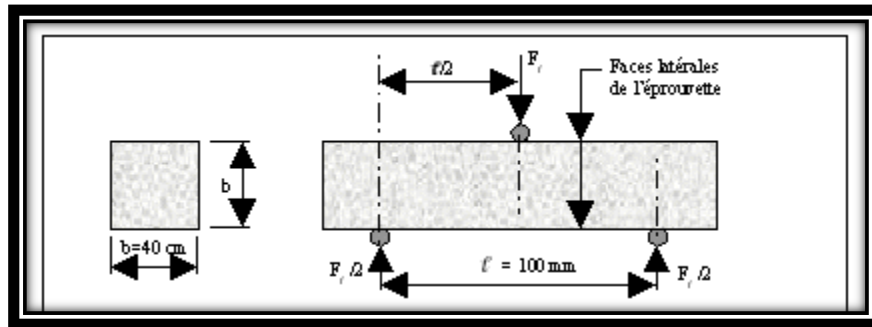


Figure II .12: Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion[33]

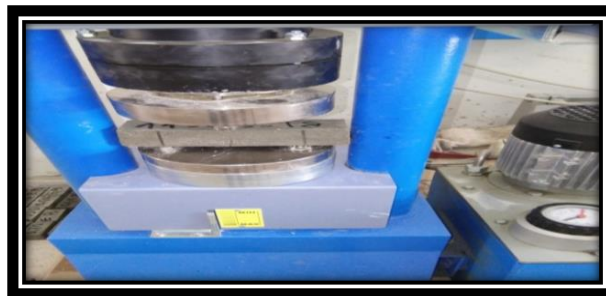


Figure II .13: Dispositif expérimental de l'essai de flexion

II.10.2.2 Résistance en compression : norme EN196-[21]

Chaque demi-éprouvette issue de l'essai de rupture par flexion est soumise à l'essai de compression sur ces faces latérales de moulage. La section visée est de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, l'échantillon est placé entre plaque de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur et de $(40 \pm 0.1) \text{ mm}$ de largeur. Les plaques sont guidées sans forttement appréciable au cours de l'essai de manière à avoir la projection horizontale, une autre plaque placée sur la surface d'écrasement peut s'incliner légèrement pour permettre un contact parfait. La résistance à la compression est calculée selon.

La formule :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots \text{(II.12)}$$

Avec :

F_c ; force de rupture ; S ; section latérale de l'éprouvette, égale à 16 cm^2 .

L'essai de compression est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique permettant d'appliquer des charges jusqu'à 150kN avec vitesse de 2400N/s (photo II.2). Cette machine est équipée d'un

dispositif de compression tel que schématisé sur la figure (II.5). Figure (II.5) : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

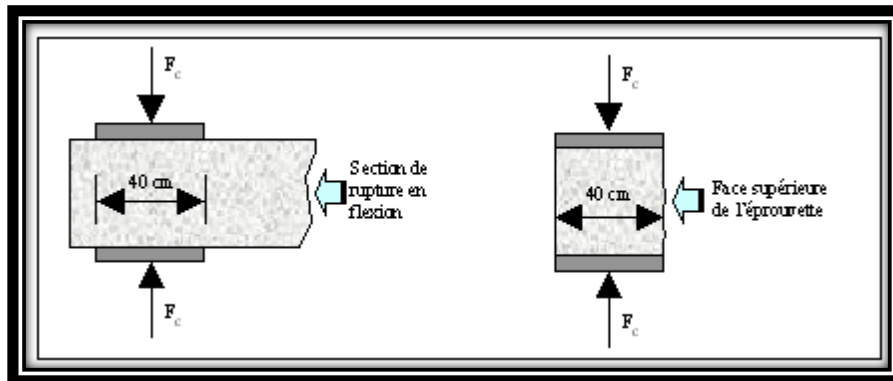


Figure II .14: Dispositif de l'essai de rupture en compression[33]

II.11 Etude de durabilité au séchage-mouillage :

L'influence des granulats de plastique sur la durabilité de mortier aux séchage-mouillage, est estimée par l'application des cycles de séchage-mouillage de 48h . Cet essai est réalisé sur des spécimens prismatiques (4x4x16) cm³ de mortier à l'âge de 1 jour.²²

Le cycle type d'exposition, est précédé d'une phase de mouillage des spécimens par immersion totale pendant 2 à 4 heures, dans l'eau potable, afin d'obtenir la saturation totale des spécimens étudiés. Après cette phase de saturation, les différents échantillons, ont été soumis à une séquence de séchage (44 ±1h), dans l'air de étuve à (105°C). Les spécimens étudiés ont été exposé aux 15 cycles de séchage- mouillage. la performance des éprouvettes est estimé par la perte en masse pour trois spécimens. Ceci est estimé par une simple pesée des trois spécimens pour chaque type de mortier élaboré(MR, MGPR10, MGPR20 et MGPR30), en utilisant une balance de précision de 0.1g.



Figure II .15:une photo des éprouvette dans l'étuve



Figure II .16: Mouillage des spécimens dans un bac d'eau potable.

Chapitre III : Résultats et discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on essaye de présenter nos résultats expérimentaux de quelques propriétés de transfert hydrique en phase liquide d'une série de mortiers confectionnés avec des différents rapports E/C. Avant d'arriver à cette fin, il nous paraît indispensable de commencer cette partie en premier, par présenter les résultats de caractérisation des matières premières utilisées pour la confection des mortiers, en second étape d'exposer les résultats physicomécaniques des mortiers élaborés, et en fin les résultats de caractérisation de comportement hydrique des mortiers élaborés.

III.2 Propriétés fraîches :

III.2.1 Consistance :

Les valeurs moyennes de l'étalement de table obtenues pour les 10 mortiers étudiés sont présentées dans la figure III.2.

Le graphe III.2 représente l'évolution de l'étalement de table des mortiers étudiés en fonction du dosage des granulats de plastique réutilisés et le rapport E/C. celui montre que la variation du rapport E/C dans la fourchette : 0.5 à 0.70 produit une hausse de l'étalement importante pour les mortiers fabriqués avec un dosage en plastique varié de 0 à 12% . Par ailleurs, l'incorporation des déchets de plastique produit une chute progressive de étalement de table en fonction du dosage en GPR . Cette tendance est due à la qualité des granulats de GPR qui diminue la plasticité du mélange et conduit à la chute de la consistance des mélange étudiés. Cette étude montre que les mélanges de granulats de plastique recyclés demande une plus d'eau de gâchage pour obtenir la même de consistance du mélange témoin qui ne contient pas des déchets de plastique recyclés.

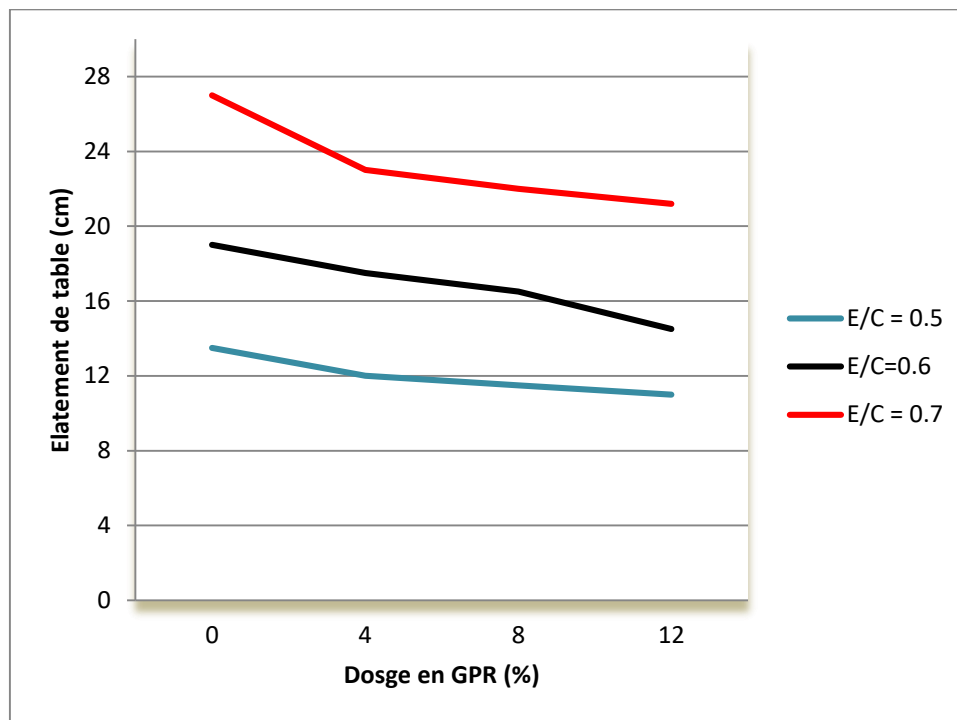


Figure.III.1. Evolution de l'étalement en fonction du dosage en GPR et le rapport E/C.

III.3 Propriétés mécanique durcies des mortiers :

III.3.1 Vitesse ultrasonique :

L'inclusion des granulats de plastique recyclés de poids léger réduire la masse volumique apparente et absolue des composite cimentaire. De plus, augmentation du rapport E/C peut changer la microstructure des matériaux cimentaires comme la distribution du réseau poreux et varié le taux de porosité ouvert des composites à base de ciment. La technique non-destructive comme les ondes ultrasonique capable de détecter les changement produit par les GPR et le rapport E/C sur la microstructure des mortiers étudiés . Les vitesses ultrasoniques des mortiers étudiés sont déterminées conformément au procédé expérimental décrit dans le chapitre II. Les spécimens testés sont séchés dans l'étuve à 105°C pendant 24 heures, pour éliminer le surplus l'eau contenue dans la porosité capillaire qui peut affectée nos résultats. Les mesures sont effectuées sur trois échantillons pour chaque composites. Les résultats moyennes de la vitesse ultrasonique sont représentés dans le la Figure III.4.

Chapitre III : Résultats et discussion

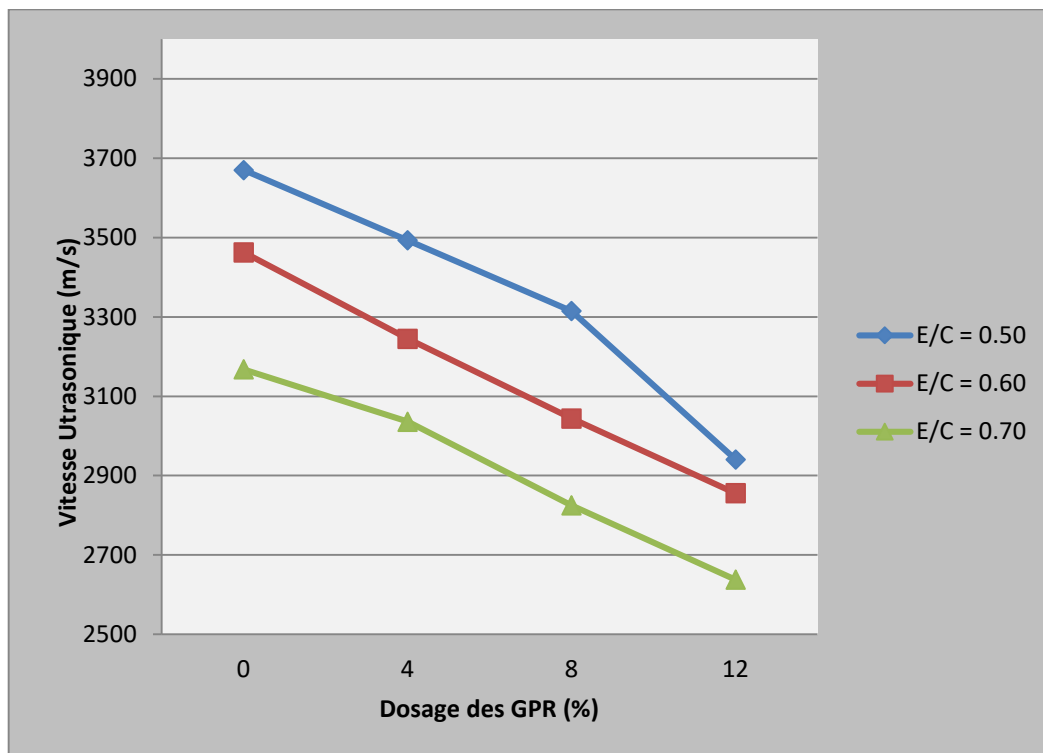


Figure.III.2. Variation de la vitesse ultra-sonique en fonction du dosage en GPR et le rapport E/C des mortiers étudiés

La figure III.2. montre nos résultats de la vitesse ultrasonique en fonction du dosage en GPR et du rapport E/C des mortiers de ciment incorporant les dosages en GPR de 0 à 12%. Nos résultats montrent que l'augmentation du rapport E/C produit une chute importante de la vitesse ultrasonique des mortiers étudiés progressivement en fonction du rapport E/C. De plus, l'inclusion des granulats de plastique recyclés dans le mortier de ciment a été diminuée la vitesse ultrasonique de façon progressive en fonction du dosage en GPR. Ce comportement est expliqué par l'effet que l'augmentation du rapport E/C augmente de taux de porosité progressivement en fonction du dosage en eau. Les granulats de plastique recyclés considérés dans la masse de mortier de ciment des vides pour cette raison nous avons enregistré une chute importante dans la vitesse ultrasonique des composites étudiés. Donc, les granulats de plastique recyclés GPR on peut utiliser avec les matériaux cimentaires secondaires qui ne demande pas une grande résistance mécanique. On peut utiliser ce type des déchets dans les structures léger parce que sa masse volumique apparente est léger.

III.3.2 Résistance en flexion

La résistance en traction par flexion a été déterminée par un essai d'écrasement des éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. On utilise trois éprouvette pour chaque composite à l'âge de 28 jours. trois points. Les résultats de l'évolution de la résistance en traction par flexion trois points des différents mortiers préparés avec en fonction du rapport E/C et le dosage de substitution des granulats de sable de dune siliceux avec les granulats de plastique recyclés présentés dans la figure.III.5 Ci-dessous :

Chapitre III : Résultats et discussion

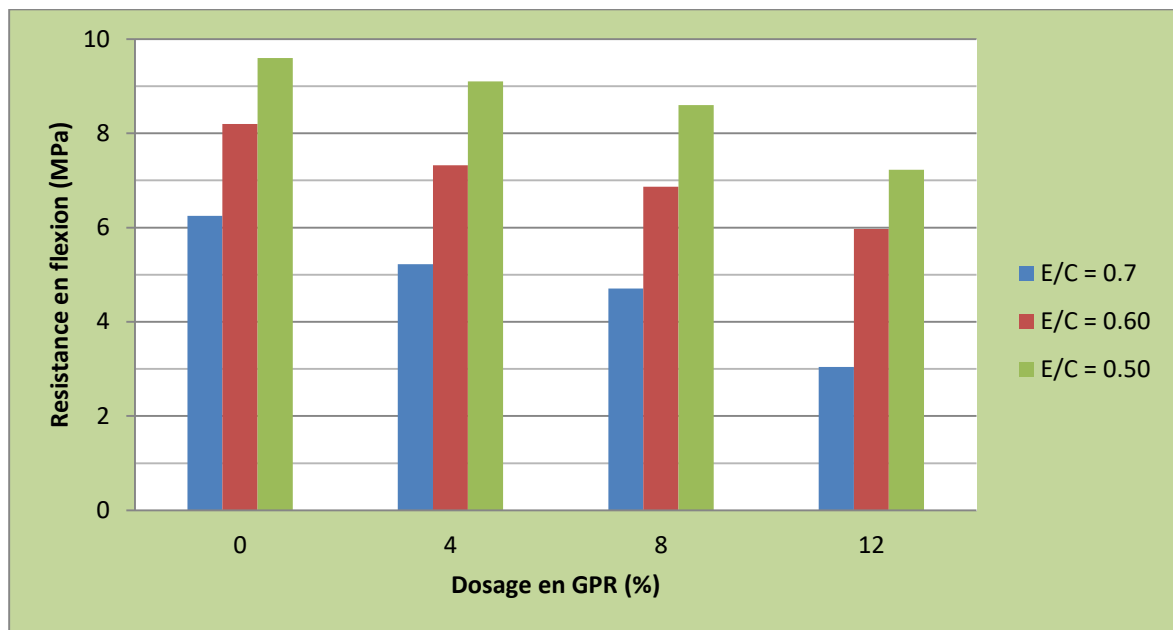


Figure.III.3. Evolution de résistance en traction par flexion en fonction du dosage en GPR et rapport E/C des mortiers étudiés à l'âge de 28 jours

Nos résultats montrent que la résistance en flexion est diminuée avec l'augmentation du rapport E/C et le dosage en granulats de plastique recyclés. Le rapport E/C optimale pour accomplir la réaction d'hydratation est environ 0.50, au-delà de cette rapport d'eau il y a un surplus d'eau qui augmente la porosité des composites étudiés et conduit à cette chute remarquée de la résistance en flexion. D'une autre coté, l'inclusion des granulats de plastique léger de faible résistance par rapport les granulats siliceux conduit aussi au chute de résistance en flexion. Donc, dans cette étude nous avons augmenté la qualité d'eau plus pour voir l'effet de surplus de la qualité d'eau sur des composites cimentaires incorporant des granulats de plastique recyclés.

III.3.3 Résistance en Compression :

La résistance à la compression des mortiers ou béton est généralement considérée comme la plus importante propriété dans de nombreux cas pratique. Elle projette généralement une image globale de la qualité du mortier du point de vue résistance puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte du ciment hydrrique. Les résultats de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction de rapport E/C et le dosage des granulats de plastique recyclés des mortiers sont représentés dans la figures III.6).

Chapitre III : Résultats et discussion

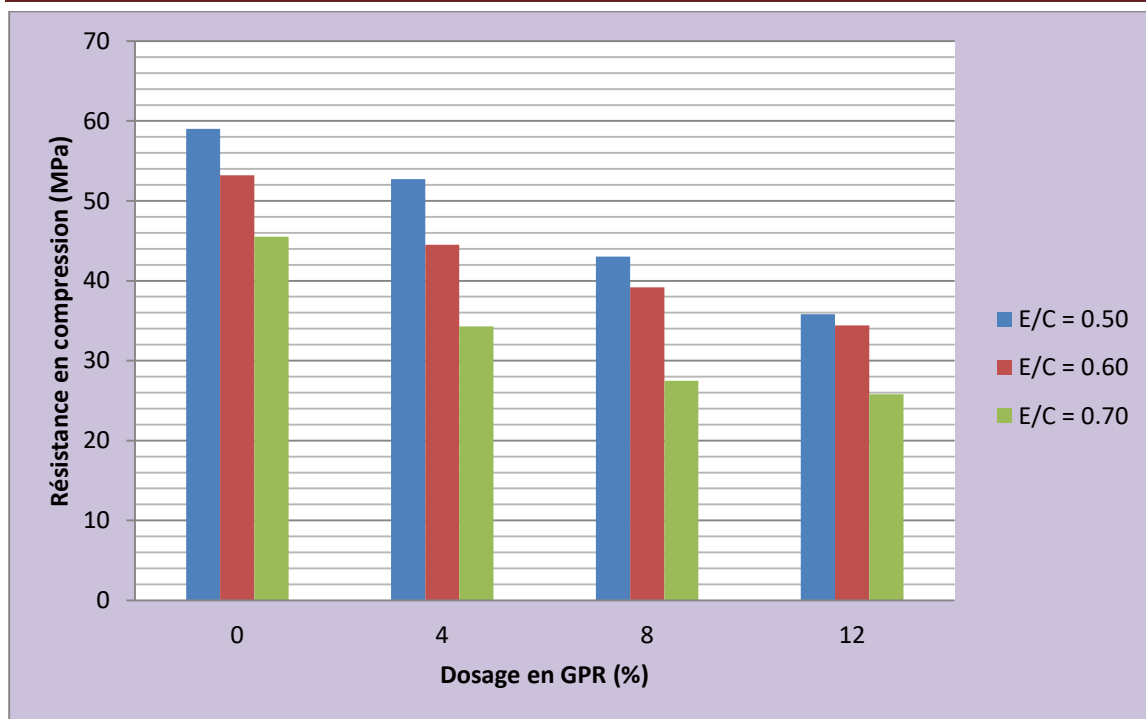


Figure.III.4. Résistance en compression en fonction du rapport E/C et le dosage en GPR des mortiers préparés

D'après la figure.III.6 la résistance en compression est diminuée avec l'augmentation du dosage de substitution des granulats siliceux avec les granulats de plastique GPR et le rapport E/C. Ce comportement est expliqué par le fait que les granulats de plastique recyclés sont moins dure par rapport les granulats siliceux. De plus, l'excès de la quantité d'eau diminue de plus la résistance en compression parce que cette quantité s'évaporer durant la période de durcissement et produit plus des vides dans la pate du ciment. Alors que, on ne peut pas incorporer une dosage élevé des granulats de plastique recyclés dans les matériaux à base de ciment qui besoin une résistance en compression élevée. Par contre, on peut incorporer les granulats de plastique dans les éléments en béton secondaires qui ne demande pas une grande résistance en compression comme les planchers et plateformes.

III.4 Transfert d'humidité en phase liquide :

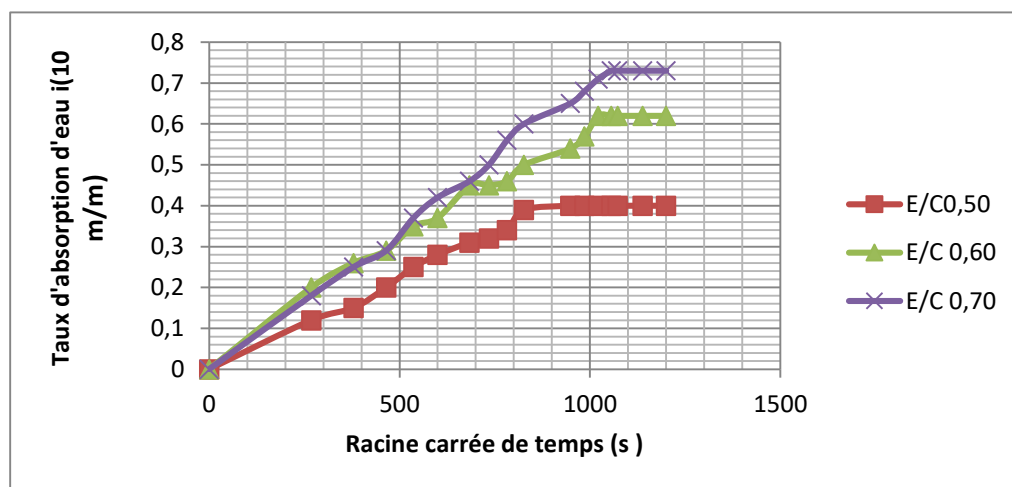
Au-delà du domaine hygroscopique seul un apport d'eau liquide peut encore faire évoluer le transfert d'humidité à l'intérieur du matériau poreux. Dans cette partie on étudier les propriétés de transfert d'humidité des mortiers incorporant des différents dosages en granulats de plastique recyclés élaborés lorsque 'ils sont en contact avec une nappe d'eau liquide. La pression capillaire P_c est dans ce cas le seul moteur qui a tendance à attirer l'eau à l'intérieur du réseau poreux. L'essai d'imbibition capillaire est effectué selon la technique décrite dans le chapitre II. Les paramètres de transfert à déterminer est absorption d'eau par capillarité à cause du temps limité consacré à ce travail et les difficultés rencontré dans la laboratoire pour copier des échantillons de mortier pour réalisé l'eau de coefficient de transfert capillaire.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.4.1 Détermination de la sorptivité des mortiers :

La sorptivité est une propriété intéressante qui caractérise la capacité d'absorption d'humidité en phase liquide en fonction du temps. Elle renseigne sur l'avidité d'un matériau à l'eau liquide. En comparant deux matériaux vis-à-vis, de l'absorption d'eau, celui ayant la sorptivité la plus élevée est celui qui absorbe le plus vite, donc il se sature plus vite que celui ayant la sorptivité la plus faible.

L'évolution des taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps par unité de surface a été suivie jusqu'à la stabilité de la masse de l'échantillon. Les courbes d'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps des différents mortiers sont représentées dans les tableaux suivantes (III.7) et (III.8) et



(III.9).

figure .III.5: Taux d'absorption d'eau en fonction des composites incorporant 4 de GPR respectivement

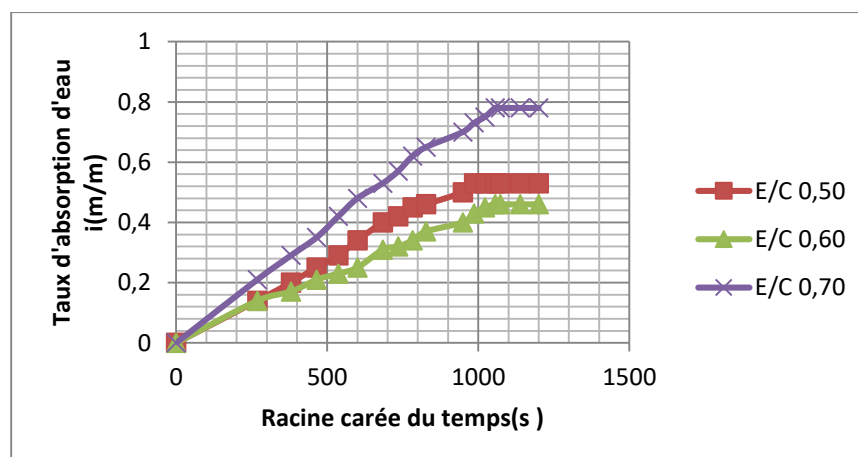


figure .III.5: Taux d'absorption d'eau en fonction des composites incorporant 8 % de GPR respectivement

Chapitre III : Résultats et discussion

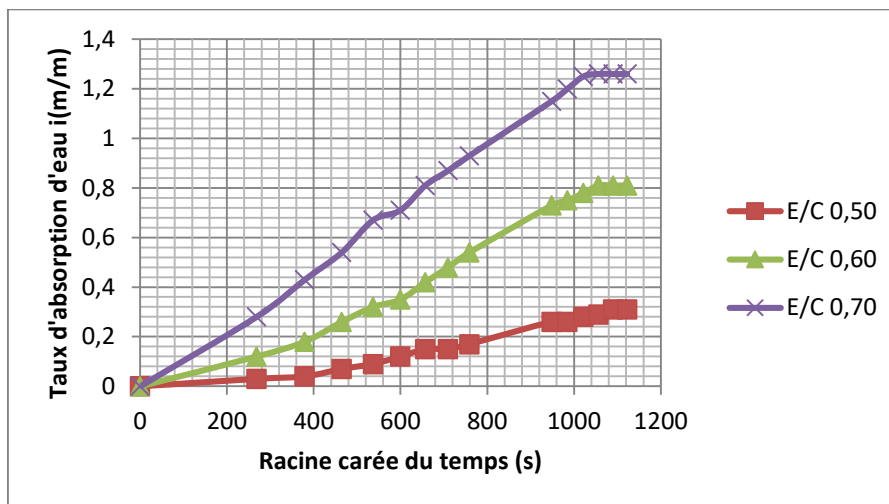


Figure .III.5: Taux d'absorption d'eau en fonction des composites incorporant 0 % de GPR respectivement.

L'allure de la courbe d'évolution $i(t^{1/2})$ est composée de deux tronçons de droite. Les premiers tronçons de pente assez forte représente l'absorption des capillaires de plus en plus fins, tandis que les deuxièmes tronçons de très faible pente représente le remplissage graduel des capillaires de tailles plus faible. Cette partie peut s'établir sur une durée assez longue jusqu'à la saturation complète des capillaires. Le coefficient de sorptivité représente par définition la pente du premier tronçon. D'après les résultats représentés dans la figures.III.5 ont remarqué que l'incorporation des déchets de plastique diminue la sorptivité capillaire des composites étudiés

Conclusion

Conclusion

Dans ce travail de recherche, nous avons étudiés les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers de plastique pour une future utilisation dans le domaine de Génie Civil. Pour d'atteindre cet objectif, ce travail a été entrepris par une révision des travaux de recherche antérieurs sur les thématiques suivantes : de mortier ou béton incorporés les déchets de plastique, leurs effet sur l'évolution des propriétés des mortiers étudiés pour les effet des dechet de plastique reemployes sur le trasfert de lhumidite en phase liquid dun mortier cimentaire. Cette partie a été suivie une description des techniques expérimentales utilisés dans notre travail pour évaluer les différentes propriétés de nos mortiers fabriqués, notamment, les propriétés frais et durcies. A la fin, une dernière partie qui regroupe les résultats expérimentaux et leurs interprétations. Ces résultats ont permis de révéler les points suivants :

- Après l'ajout de déchet de plastique on trouve :
 - L'étalement de mortier perd sa fluidité au tant que l'augmentation de pourcentage de déchet de plastique .
 - Dans l'essai de l'absorption la quantité d'eau dans le mortier augmente avec l'augmentation de pourcentage de déchet de plastique .
 - La vitesse de l'ultrasonique diminue avec l'augmentation du pourcentage de déchets de plastique cela qui confirme l'augmentation des vides dans le mortier.
 - Dans l'essai d'écrasement la résistance en flexion et en compression diminuées avec l'augmentation de pourcentage de déchet de plastique.

L'étude de l'effet des granulats de plastique avec les matériaux cimentaires c'est un sujet d'actualité très vaste qui ne peut en aucun cas être investi en un sujet de master. Ce mémoire n'a traité qu'un cas particulier de substitution des granulats naturels par les granulats de plastique pour un matériau bien spécifié. L'étude de la microstructure est un volet aussi très important pour découvrir l'interaction de ce type des granulats avec les granulats naturels silico-calcaire.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] M.N. Adam, Propriétés des bétons, Ed Eyrolles, pp. 754 (1998), Paris.
- [2] G. Dreux, J. Festa, Nouveau guide de béton et de ses constituants, Ed Eyrolles, pp.317 (1998),Paris.
- [3] Normes Afnor : Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers. (1981-1997) :
- o NF P 18-303 : Essais sur l'eau de gâchage.
 - o NF P 15-560 : Analyse granulométrique par tamisage. Octobre 1997.
 - o NF P 18-598 : Equivalent de sable. Octobre 1991.
 - o NF P 18-451 : Essai d'affaissement. Décembre 1981.
 - o XP P 18-540 : Granulats : définitions, conformité, spécification. Octobre 1997.
 - o NF P 18-555: Mesure de la masse volumique, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux. Décembre 1980.
 - o NF P 15-433 : détermination du retrait et gonflement. Janvier 1994.
 - o NFP 18-400 : Moule pour éprouvettes cylindriques et prismatiques. Décembre 1981.
 - o NFP 15-476 : Détermination de la finesse de ciment. Août 1990.
 - o NFP 15-474 : Détermination quantitative des constituants de ciment. Février 1994.
 - o NF P 15-573 : Détermination du temps de prise et de stabilité. Août 1995.
 - o NF P 15-532 : Détermination de l'expansion de ciment. Août 1995.
 - o NF P 15-471 : Détermination des résistances mécaniques. Août 1995.
 - o NF P 18-558: Détermination de la masse volumique absolue des fines. Décembre1990.
 - o NF P 15-301 : Ciments courants : composition, spécifications et critères de conformité. Juin1994.
- [4] J. Baron, J.P. Ollivier, Les Bétons bases et données pour leur formulation, Ed Eyrolles, pp. 345 (1998), Paris
- [5] H.H. Steneinour, The system $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ and the hydration of the calcium silicates, Chemical Reviews, pp. 40 (1947).
- [6] T.C. Powers, The physical structure and engineering properties of concrete, Portland. Cement. Association. Research. Department. Building. pp. 39 (1958).
- [7] COURS de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada). Site Internet : www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/84.
- [8] R.A. Olson, H.M. Jennings, Estimation of C-S-H in a blended cement paste using water

Bibliographie

adsorption, *Cement and Concrete Research*, vol.31, pp.351-356 (Décember 2000).

[9] F.P. Glasser, Progress in the immobilization of radioactive wastes in cement, *Cement and Concrete Research*, pp. 16-201 (1992).

[10] M.R. Rössler, and I. Odler, Investigation on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes, Effect of porosity, *Cement and Concrete Research*, vol.15, n°.2, pp.320-330 (1985).

[11] P. Crausse, Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieux poreux non saturé. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2 vols. pp.209 (1983), France.

[12] Y. Couasnet, Les condensations dans les bâtiments, Presses des Ponts et Chaussées, pp.319 (1986), Paris.

[13] C. Raymond, L'humidité des bâtiments anciens: Causes et effets diagnostic et remèdes, Ed du Moniteur Technique, pp.13-30(1989), Paris.

[14] S. Bories, Analyse critique des différents modèles mathématiques utilisés pour les transferts de masse et de chaleur, Collège International des Sciences de la Construction, ITBTP (1982).

[15] D. Quénard, H. Sallée, Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment, Cahier du CSTB, pp.1-18 (1991), Paris.

[16] L. Guelmine, Influence du rapport E/C et du mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques et de transfert d'humidité des mortiers de ciment durcis, Mémoire de Magister, Université Amar Telidji de Laghouat, 2006 pp. 86.

[17] A.V. Luikov, Heat and mass transfer in capillary porous bodies, Pergamon Press, (1966).

[18] J.R. Philip, D.A. De vries, Moisture movement in porous materials under temperature gradient, *Transaction of American Geophysical Union*, Vol.38, n°2, pp.222-232 (1957).

[19] D.A. De vries, The theory of heat and mass transfer in porous media revisited, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 30, n°.7, pp.1343-1350 (1987).

[20] L. Merouani, Phénomène de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du Bâtiment, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, pp.190 (1987), France

[21] *Plastics Europe: Plastics-the Facts 2013. An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data.* 2013.

[22] Zhou C, Fang W, Xu W, Cao A, Wang R: Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *J. Clean. Prod.*2014, 80: 80-86.

Bibliographie

- [23] Papong S, Malakul P, Trungkavashirakun R, Wenunun P, Chom-in T, Nithitanakul M: Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. *J. Clean. Prod* 2014, 65: 539-550.
- [24] Badia JD, Stromberg E, Karlssonb S, Ribes-Greus A: The role of rystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET). *Polym. Degrad. Stab* 2012, 97: 98-107.
- [25] Regourd M, Hornain H, Mortueux B: Microstructure of concrete in aggressive environments durability of building material an components. *American Society for Testing Materials* 1980, 253-268.
- [26] Benosman A, Mouli M, Taibi H, Belbachir M, Senhadji Y: Resistance of polymer (PET)-mortar composites to aggressive solutions. In: *International Journal of Engineering Research in Africa: 2011*: Trans Tech Publ; 2011: 1-15.
- [27] Ghernouti Y, Rabehi B: Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials* 2012, 6(3):145-153.
- [28] Batayneh M, Marie I, Asi I: Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste management* 2007, 27(12):1870-1876.
- [29] Choi YW, Moon DJ, Kim YJ, Lachemi M: Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials* 2009, 23(8):2829-2835.
- [30] Albano C, Camacho N, Hernandez M, Matheus A, Gutierrez A: Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management* 2009, 29(10):2707-2716.
- [31] Senthil Kumar K, Baskar K: Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries. *J Mater Cycles Waste Manag* 2015, 17:718 .
- [32] Guelminelayachi, Matériaux recyclés, Cours de Master Matériaux. <https://elearning@univ-bba.dz>
- [33] Guelminelayachi, Contribution à l'étude de la durabilité de composite cimentaire incorporant les granulats des pneus usés sous l'effet d'un gel et à l'effet de la haute température. Thèse de Doctorat en Science, 2017, Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene