

11/2004-10/03

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen  
Faculté des Sciences  
Département de physique

## Mémoire de Fin d'Études

Présenté en vue de l'obtention du grade  
**INGENIEUR PHYSICIEN**  
Option: Matériaux et Caractérisation

# Propriétés Physico-mécaniques d'un Mortier de Ciment Portland, allégé par des Particules Polymères

Présenté par:

**M<sup>r</sup> MERGHACHE AMAR**

Soutenu le 01 juillet 2010 devant le jury composé de:

Mr BENSATI	Abdelhamid	Maître de conférences	Président
Mr KOTBI	Mohammed	Maître de conférences	Examineur
Mr DALI YOUSSEF	Boumediène	Maître de conférences	Examineur
Mr MAHDAD	Yassine M <sup>ed</sup>	Maître de conférences	Examineur
Mr BOUSSEID	Abdelhak	Maître de conférences	Encadreur

Année Universitaire: 2009 - 2010



## Glossaire

**ABS**

Acrylonitrile, Butadiène, Styrène

**AFM**

Microscopie à force atomique de l'anglais Atomic Force Microscopy

**CEM I 42,5 R**

Ciment Portland à prise rapide dont la résistance caractéristique minimum en compression à 28 jours est égale à 42,5 MPa R

**CEReM**

Consortium d'étude et de recherche sur les mortiers

**COT**

Dosage du carbone organique total

**C<sub>4</sub>AF**

Ferroaluminate tétracalcique qui confère sa couleur grise au ciment gris.

**C<sub>3</sub>A**

Aluminate tricalcique, une des phases pures du ciment

**C<sub>3</sub>S**

Silicate tricalcique, la phase pure majoritaire du ciment

**C<sub>2</sub>S**

Silicate dicalcique, une des phases pures du ciment

**CaCl<sub>2</sub>**

Chlorure de calcium

**Ca (OH)<sub>2</sub>**

Hydroxyde de calcium

**CMC**

Concentration micellaire critique. Concentration à partir de laquelle des tensioactifs commencent à former des micelles

**C=O**

Groupe carbonyle

**COO**

Groupe carboxylique

**C-S-H**

Silicate de calcium hydraté, produit issu de l'hydratation du  $C_3S$

**CSTB**

Centre scientifique et technique du bâtiment

**DLVO**

Théorie de Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek qui permet d'expliquer l'interaction à longue distance de deux particules chargées

**DSC**

Calorimétrie à balayage différentiel

**E/C**

Rapport eau sur ciment

**EO**

Groupe oxyde d'éthylène

**Fig.**

Figure

**FTIR**

Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

**ITE**

Isolation Thermique par l'Extérieur

**L/S**

Rapport liquide sur solide

**MEB**

Microscopie électronique à balayage

**MgO**

Oxyde de magnésium

**PC**

Pourcentage de complexation

**PEhd et PEbd**

Le polyéthylène

**PEO**

Poly (oxyde d'éthylène)

**PET**

Le polyéthylène téréphtalate

**PMMA**

Polyméthacrylate de méthyle

**PP**

Le polypropylène

**PS**

Le polystyrène

**PVC**

Le polychlorure de vinyle

**PVOH**

Alcool polyvinylique

**SO<sub>3</sub>-**

Groupe sulfonate

**Tab.**

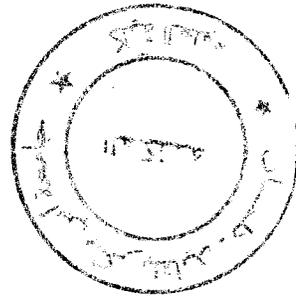
Tableau

**Tg**

Température de transition vitreuse

## Liste des symboles

$M_{v, app}$	La masse volumique apparente.
$R_f$	La contrainte de rupture en traction par flexion.
$R_c$	La contrainte de rupture en compression.
$F_f$	La charge de rupture en traction par flexion.
$F_c$	La charge de rupture en compression.
$\rho$	La masse volumique.



## Table des illustrations

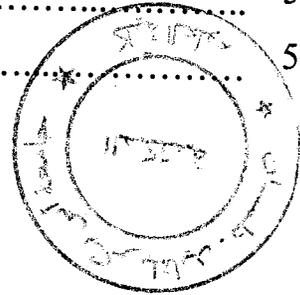
<b>Figure 1.1.</b> Schéma récapitulatif de l'hydratation de deux grains de ciment...	8
<b>Figure 1.2.</b> Aiguilles d'ettringite.....	10
<b>Figure 1.3.</b> Monosulfoaluminate.....	10
<b>Figure 1.4.</b> Cristaux de Portlandite.....	12
<b>Figure 1.5.</b> Gel de C-S-H.....	12
<b>Figure 1.6.</b> Différentes phases de C-S-H. Le point invariant A correspond à la coexistence de la silice et de la phase $\alpha$ , le point B à la coexistence des phases $\alpha$ et $\beta$ , le point C à la coexistence des phases $\beta$ et $\gamma$ , et le point D à la coexistence de la portlandite avec la phase $\gamma$ . Les positions respectives des points invariants C et D est à l'heure actuelle encore l'objet d'investigations, et il est probable que le point C se trouve en fait au-delà de la saturation de la portlandite à 25°C.....	13
<b>Figure 1.7.</b> Structure de la tobermorite qui contient un double plan d'ions calcium au centre auquel sont greffées des chaînes de silicate de chaque côté. Les unités répétitives, appelées dreierketten qui forment les chaînes, sont constituées de deux tétraèdres appariés reliés aux polyèdre CaO par un sommet, et d'un tétraèdre pontant orienté dans l'autre sens. L'arrangement des tétraèdres de silice est également représenté dans les unités dreierketten...	14
<b>Figure 1.8.</b> Evolution de la structure du C-S-H lorsque le rapport Ca/Si passe de 0,66 à 1,5. Les charges électriques sont localisées à la surface des lamelles de C-S-H.....	15
<b>Figure 3.1.</b> Types de composites.....	34
<b>Figure 4.1.</b> Moules pour moulage des éprouvettes de mortier.....	40
<b>Figure 4.2.</b> Malaxeur.....	40
<b>Figure 4.3.</b> Dame de chocs.....	40

---

<b>Figure 4.4.</b> Moule de mortier/polymère ABS.....	40
<b>Figure 4.5.</b> Démoulages des éprouvettes.....	43
<b>Figure 4.6.</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	45
<b>Figure 4.7.</b> Dispositif de rupture en compression.....	45
<b>Figure 4.8.</b> Allègement du matériau.....	47
<b>Figure 4.9.</b> Machine d'essais de résistance.....	48
<b>Figure 4.10.</b> Accessoires des essais de mortier.....	48
<b>Figure 4.11.</b> Essai de traction par flexion.....	48
<b>Figure 4.12:</b> Essai de compression.....	48
<b>Figure 4.13.</b> Rupture brusque.....	48
<b>Figure 4.14.</b> Rupture cônique.....	48
<b>Figure 4.15.</b> Résistance à la traction par flexion des composites.....	48
<b>Figure 4.16.</b> Résistance à la compression des composites.....	48
<b>Figure 4.17.</b> résistance à la compression en fonction de la masse volumique..	51
<b>Figure A.1.</b> Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS).....	57
<b>Figure A.2.</b> Composition granulométrique du sable de référence CEN.....	58

**Table des tableaux**

<b>Tableau 2.1.</b> Caractéristiques physiques moyennes de quelques polymères thermoplastiques usuels.....	31
<b>Tableau 4.1.</b> Les doses utilisées dans les mélanges.....	41
<b>Tableau 4.2.</b> Opération pour déterminer le mortier normal.....	42
<b>Tableau 4.3.</b> Les limites de temps par rapport à l'âge.....	44
<b>Tableau 4.4.</b> Allègement du matériau.....	47
<b>Tableau 4.5.</b> Résistance à la traction par flexion à 7 jours.....	49
<b>Tableau 4.6.</b> Résistance à la traction par flexion à 14 jours.....	49
<b>Tableau 4.7.</b> Résistance à la traction par flexion à 28 jours.....	49
<b>Tableau 4.8.</b> Résistance à la compression à 7 jours.....	50
<b>Tableau 4.9.</b> Résistance à la compression à 14 jours.....	50
<b>Tableau 4.10.</b> Résistance à la compression à 28 jours.....	50



## Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	<b>II</b>
<b>Glossaire</b> .....	<b>III</b>
<b>Liste des symboles</b> .....	<b>VI</b>
<b>Table des illustrations</b> .....	<b>VII</b>
<b>Table des tableaux</b> .....	<b>IX</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Le ciment Portland</b> .....	<b>5</b>
I.1.1. Le ciment Portland et son hydratation.....	6
I.1.1.1. Hydratation des aluminates .....	9
I.1.1.2. Hydratation des silicates.....	11
I.1.2. L'importance du C-S-H dans l'hydratation du ciment Portland.....	12
I.1.3. Evolution des propriétés mécaniques du ciment Portland.....	17
<b>I.2. Le mortier</b> .....	<b>19</b>
I.2.1. Définition.....	19
I.2.2. Mortier romain antique.....	19
I.2.3. Réalisation du mortier.....	20
I.2.4. Utilisation des mortiers.....	20
I.4. Conclusion.....	21
<b>Chapitre II: Les plastiques</b> .....	<b>22</b>
II.1. Définition.....	23
II.2. Types de plastiques.....	23
II.2.1. Les thermoplastiques.....	24
II.2.2. Les thermodurcissables.....	25
II.3. La valorisation matière.....	25
II.3.1. Le recyclage mécanique des thermoplastiques.....	25

II.3.2. Le recyclage chimique.....	26
II.3.3. Les autres modes de valorisation matière.....	27
II.4. La valorisation énergétique.....	29
II.5. Caractéristiques des plastiques.....	29
II.6. Conclusion.....	32
<b>Chapitre III: Les composites.....</b>	<b>33</b>
III.1. Introduction.....	34
III.1.1. Composites renforcés par des particules .....	35
III.1.1.1. Composites à grosses particules.....	35
III.1.1.2. Composites renforcés par dispersion.....	35
III.1.2. Composites renforcés par des fibres.....	36
III.1.3. Composites structuraux.....	36
III.2. Le composite polymère/ciment.....	36
III.3. Conclusion.....	37
<b>Chapitre IV: Partie pratique.....</b>	<b>38</b>
IV.1. Réalisation des éprouvettes.....	39
IV.1.1. Matériel utilisé.....	39
IV.1.2. Matériaux utilisés.....	40
IV.1.3. Travail effectué.....	41
IV.1.3.1. Préparation du matériau.....	41
IV.1.3.3. Mode opératoire.....	42
IV.1.3.3.1. Préparation du mélange.....	42
IV.1.3.3.2. Confection des éprouvettes.....	43
IV.1.3.3.3. Démoulage des éprouvettes.....	43
IV.2. Essais destructifs.....	43
IV.2.1. Objectif de l'essai.....	43
IV.2.2. Principe de l'essai.....	44
IV.2.3. Conduite de l'essai .....	44

---

IV.2.4. Résistance normale.....	46
IV.3. Résultats expérimentaux et analyses.....	46
IV.3.1. Allègement du matériau.....	46
IV.3.2. Résistances mécaniques (compression - traction par flexion).....	48
IV.3.2.1- Résistance à la traction par flexion.....	49
IV.3.2.2. Résistance à la compression.....	50
IV.3.2.3. Description du comportement physico-mécanique du mortier.....	51
IV.4- Conclusion.....	55
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>56</b>
<b>Annexe I.....</b>	<b>58</b>
<b>Annexe II.....</b>	<b>59</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>60</b>

# *Introduction générale*

## *Introduction générale*

La prise en compte de l'impact environnemental des constructions et plus généralement des politiques de développement durable a conduit à s'interroger sur des procédés et des matériaux de construction alternatifs. L'objectif étant de limiter les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre, économiser les ressources naturelles, penser à la déconstruction, tout en améliorant les propriétés d'usages des matériaux conventionnels. Dans ce contexte, de nouveaux matériaux innovants, destinés à la construction, vont devoir, à terme, remplacer les matériaux usuels. Le choix des matériaux utilisés, pour l'élaboration de ces composites, a une répercussion directe sur la consommation en matières premières et en énergie. Ainsi, l'utilisation de co-produits industriels, comme granulats de substitution, apporte une réponse au problème d'épuisement des ressources naturelles.

Le but de ces travaux, qui s'inscrivent dans une démarche de "Développement Durable", visait à valoriser des co-produits polymères issus de diverses industries (automobile, ménagère,...) par leur incorporation dans une matrice de ciment. L'objectif est de développer un matériau composite de type "béton léger", pouvant être utilisé dans la construction.

L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats ainsi qu'à l'obligation de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes. En Algérie, l'accumulation de déchets de plastique, tels que les ustensiles et autres hors d'usage, constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Afin de mieux préserver l'environnement, plusieurs actions de valorisation devraient être entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction. Dans ce mémoire, plusieurs travaux, concernant l'emploi de granulats de plastique, ont été réalisés.

Ces derniers ont montré l'intérêt de l'association ciment/polymère dans l'élaboration de composites à base de ciment. D'autres travaux, portant sur la durabilité de ces composites, ont également montré l'importance du type de polymère sur leur comportement dans des conditions climatiques sévères. Une étude récente sur l'élaboration de composites à base de ciment et de particules de polymère, a mis en évidence des propriétés compatibles avec l'utilisation en isolant porteur du matériau.

Toutefois, certaines études ont porté sur la valorisation de granulats de polymère, récupéré de divers ustensiles usés ou de caoutchouc modifié, débarrassés des parties métalliques et textiles.

Le présent travail a pour but de contribuer à leur valorisation par leur incorporation dans une matrice à base de ciment Portland, en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application des bétons légers. Le composite élaboré est un mortier dans lequel le sable a été substitué par les particules de polymère à des teneurs volumiques de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 %. Il s'agit d'évaluer les propriétés à l'état durci tels que l'allègement, les résistances mécaniques en compression et traction par flexion. Nous avons utilisé un polymère (granulat) nommé ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène), destiné à la fabrication de socles de batteries de voitures récupérées à l'usine de la SONELEC de Tlemcen.

Ce mémoire est organisé comme suit:

- Le premier chapitre est destiné à l'introduction des matériaux de construction, notamment le ciment Portland et ses composites.
- Le second chapitre décrit brièvement les matériaux polymères ainsi que leur valorisation par récupération.
- Les composites sont décrit succinctement dans le troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation et l'étude expérimentale d'un mortier composite constitué de ciment Portland et d'Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS).

# Chapitre I

## Le ciment Portland

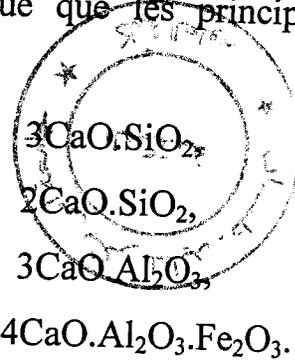
## I.1. Le ciment Portland, un matériau complexe

### I.1.1. Le ciment Portland et son hydratation

Le ciment Portland est une poudre minérale dont la propriété est de durcir au contact de l'eau. De ce fait, il est appelé liant hydraulique. Ce dernier est obtenu par le broyage du clinker et du sulfate de calcium. Le clinker est issu de la cuisson à haute température ( $1450^{\circ}\text{C}$ ) d'un mélange de 20% d'argile et 80% de calcaire. Au besoin, du minerai de fer, de la bauxite et du sable sont ajoutés à ce mélange afin d'obtenir la composition désirée. A l'issue de cette cuisson, le clinker est broyé avec environ 5% de sulfate de calcium. Ce sulfate de calcium permet de réguler l'hydratation du ciment. Il peut se présenter sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), d'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) ou de mélange des deux. Le gypse est souvent associé à de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ).

Ces différents minéraux sont des sources de chaux  $\text{CaO}$ , de silice  $\text{SiO}_2$ , d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et de ferrite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ce qui explique que les principaux constituants du ciment Portland soient:

- Le silicate tricalcique
- Le silicate bicalcique
- L'aluminate tricalcique
- Le ferroaluminate tétracalcique



Les silicates représentent 80% en masse de la composition du ciment tandis que les aluminates sont présents à hauteur de 20% en masse.

Afin de simplifier les écritures, les différentes phases minérales du ciment s'écrivent dans la nomenclature utilisée communément dans la chimie du ciment  $\text{C}_3\text{S}$  (alite) pour le  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  (bélite) pour le  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  pour le  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  pour le  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

C représente la chaux  $\text{CaO}$ , Š remplace la silice  $\text{SiO}_2$ , A représente l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , F remplace la ferrite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , S remplace le trioxyde de soufre

$\text{SO}_3$  et H est utilisé pour l'eau. Le  $\text{C}_3\text{S}$  représente 50 à 70 % en masse du clinker, le  $\text{C}_2\text{S}$  15 à 30 % en masse, le  $\text{C}_3\text{A}$  5 à 10 % en masse et le  $\text{C}_4\text{AF}$  5 à 15 % en masse de ce dernier.

Lorsqu'elles sont mises au contact de l'eau, les différentes phases pures du ciment s'hydratent suivant un processus exothermique de dissolution-précipitation pour former un matériau cohésif. L'hydratation du ciment se fait en 5 étapes (voir figure 1.1). Pendant la première étape, qui dure une quinzaine de minutes, l'hydratation initiale a lieu. Elle consiste en la dissolution des composés les plus solubles ( $\text{NaSO}_4$ ,  $\text{KSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ). Parallèlement, l'hydrolyse des silicates les plus réactifs par dissolution complète (congruente) ou sélective (incongruente) produit des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$ .

Il en résulte une forte augmentation du pH et de la proportion des silicates et des aluminates en solution. Ces phases sont, en effet, très solubles dans les solutions très alcalines. La dissolution de ces produits s'accompagne de la formation d'une couche mince de produits intermédiaires amorphes. Le premier gel qui se forme est composé majoritairement d'aluminates. Il se forme également rapidement du gel de C-S-H sur le  $\text{C}_3\text{S}$ .

La précipitation des premiers hydrates par nucléation hétérogène (à l'interface solide/solution) s'accompagne d'un ralentissement brutal des réactions d'hydratation. C'est pourquoi, il apparaît une nouvelle période appelée période d'induction ou période dormante. Ce ralentissement est dû à la formation d'une couche d'hydrates peu perméables autour des grains anhydres.

La réaction de dissolution est alors limitée par la diffusion des ions à travers cette couche. Au bout de quatre heures environ, la concentration de la solution devient sursaturée par rapport à la portlandite (la portlandite est un hydrate issu du ciment que nous présenterons dans la suite du paragraphe). La précipitation de la portlandite, qui se produit à ce moment là, consomme une quantité importante de calcium. On parle ainsi d'un effet de «pompe à calcium» à la surface des grains en cours de réaction. L'apparition de l'accélération est due

notamment à une rupture de la couche protectrice d'hydrates par des effets osmotiques. Les phénomènes de cristallisation reprennent à partir de la solution saturée par un processus de nucléation homogène. Le déclenchement de cette cristallisation et l'accélération de la réaction accompagnent la structuration de la pâte pendant environ quatre heures. L'épuisement progressif des anhydres entraîne la décélération de l'hydratation. Le durcissement de la pâte se produit alors pendant les seize heures qui suivent. Le renforcement des propriétés mécaniques, appelé cure du matériau, dure plusieurs dizaines de jours[1].

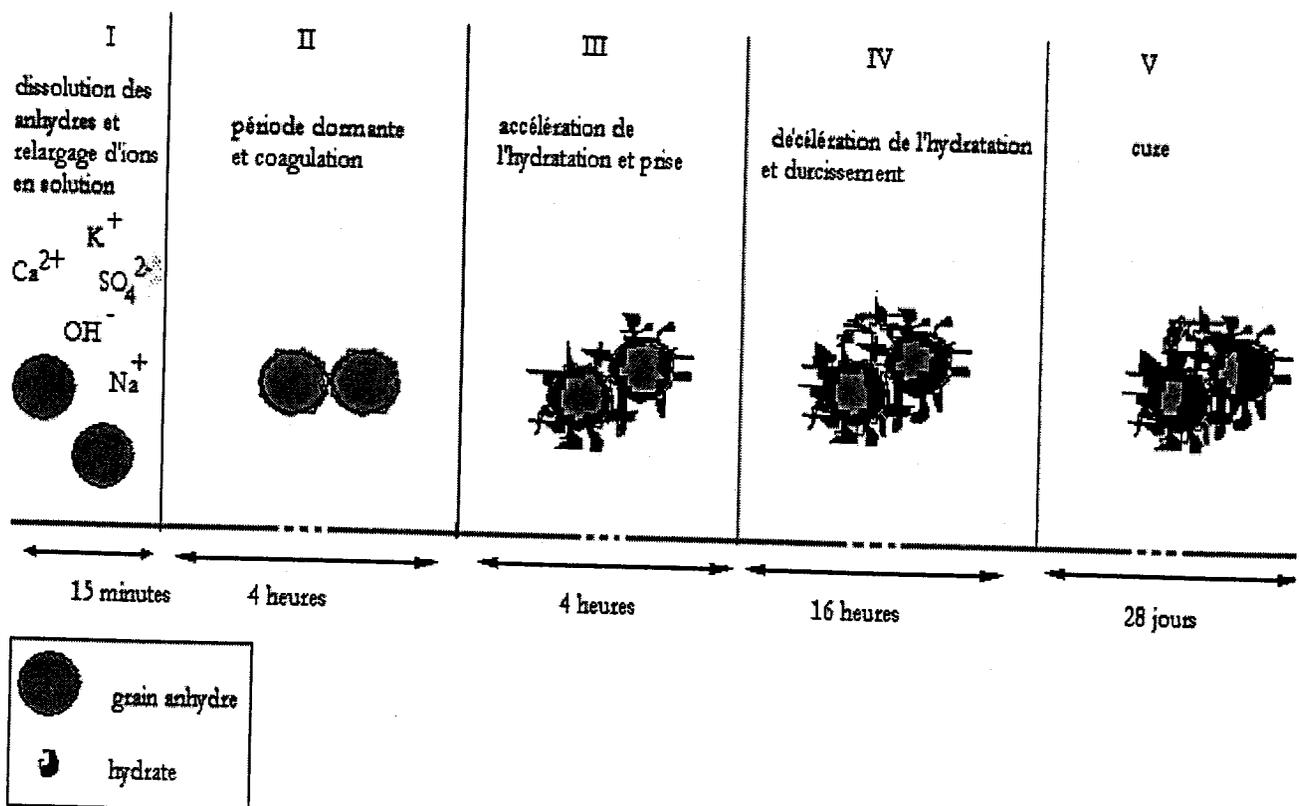


Fig. 1.1. Schéma récapitulatif de l'hydratation de deux grains de ciment.

Les quatre phases majoritaires du ciment peuvent être divisées en deux familles: les aluminates ( $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$ ) et les silicates ( $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ ). Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques. Seules les cinétiques des réactions diffèrent. Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de

ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte [1].

### 1.1.1.1. Hydratation des aluminates

Les hydrates issus du  $C_4AF$  se déduisent de ceux du  $C_3A$  par substitution de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) par l'alumino-ferrite ( $Al_2O_3.Fe_2O_3$ ) dans les formules chimiques. C'est pourquoi, dans cette partie, seule l'hydratation du  $C_3A$  est présentée.

En l'absence de sulfates, le  $C_3A$  est très réactif lorsqu'il rentre en contact avec l'eau. Par contre, en présence de gypse, son hydratation est régulée et conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou ettringite (voir figure 1.2). L'ettringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le  $C_3A$  est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le  $C_3A$  n'est pas complètement hydraté, l'ettringite se transforme en monosulfoaluminate tétracalcique (voir figure 1.2). De plus, si après la formation du monosulfoaluminate tétracalcique il reste du  $C_3A$ , il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate du type  $\{C_3A, xCS_{(1-x)}CH, H_{19}\}$ . Ces différentes réactions sont résumées par les équations bilan (1), (2) et (3).

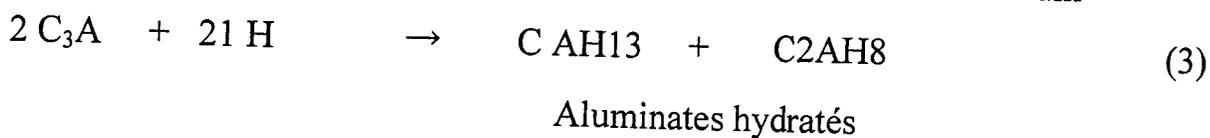
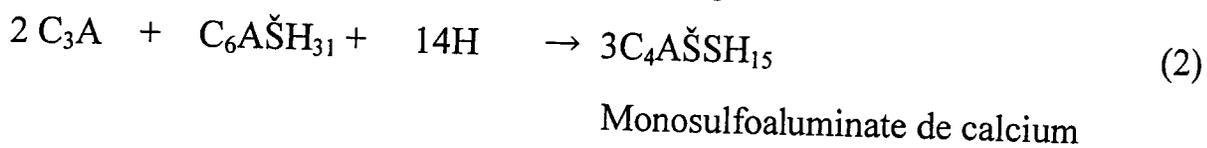
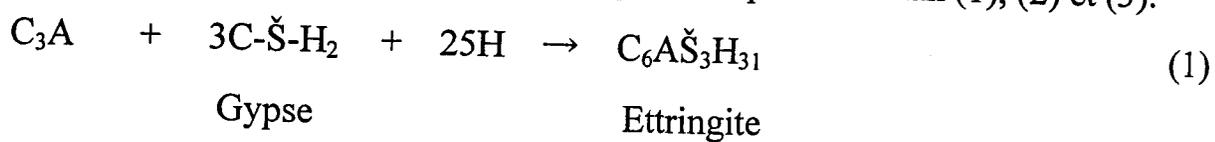




Fig. 1.2. Aiguilles d'ettringite.



Fig. 1.3. Monosulfoaluminate.

Le  $C_3A$  et le gypse se dissolvent les premiers lors de l'hydratation du ciment. Le  $C_3A$  s'enrobe ensuite d'une couche protectrice d'ettringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recristalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques. C'est pourquoi, la présence de l'ettringite fragilise le matériau. Le monosulfoaluminate cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. Sa structure est constituée d'une double couche d'hydroxyde avec une couche d'hydroxyde de calcium dans laquelle le tiers des ions calcium est remplacé par des ions  $Al^{3+}$  ou  $Fe^{3+}$  et des contre-ions sulfates entourés de molécules d'eau dans l'espace interfeuille. L'ettringite et les monosulfates représentent 20 à 30 % en masse du ciment hydraté. La vitesse de recristallisation de l'ettringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de garder la maniabilité de la pâte dans les premières heures.

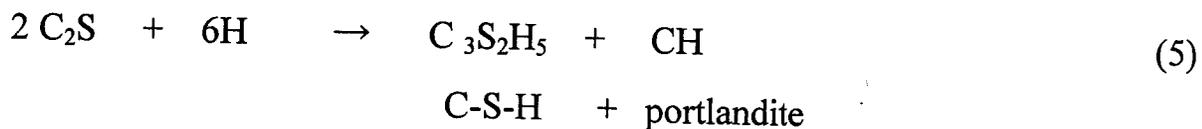
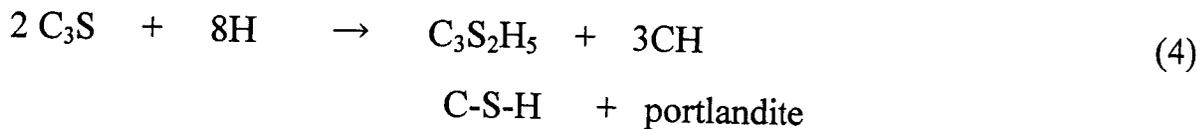
En outre, plus le  $C_3A$  est réactif, plus la vitesse de mise en solution et la solubilité du sulfate de calcium doivent être élevées pour que la réaction (1) soit favorisée. Dans le cas contraire, la réaction (3) prédomine. C'est pourquoi, le  $C_3A$  est très important dans l'hydratation du ciment, sa réactivité et le type de sulfate de calcium utilisé ayant un effet direct sur la prise de la pâte de ciment.

En effet, dans un ciment à fort taux de  $C_3A$ , l'enchevêtrement des aiguilles entraîne un raidissement de la pâte qui conduit à un temps de prise (mesuré par sonde Vicat) plus court que dans un ciment à faible taux de  $C_3A$ . C'est pourquoi,

afin de simplifier les réactions mises en jeu, nous avons choisi le ciment Portland ne contenant pas de  $C_3A$  pur mais seulement du  $C_4AF$ .

### I.1.1.2. Hydratation des silicates

L'hydratation des silicates conduit à la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et d'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH) selon les équations (4) et (5):



La majeure partie de l'hydratation du  $C_3S$  se passe dans les vingt-huit premiers jours suivant le contact avec l'eau. Elle participe à la prise initiale et contribue aux résistances initiale et finale de la pâte. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année voire plus.

L'hydratation du  $C_2S$  est beaucoup plus lente que celle du  $C_3S$ . Il participe aux résistances au-delà d'une semaine après le contact avec l'eau. La quantité de portlandite produite est plus faible d'un tiers que dans le cas du  $C_3S$ .

La portlandite est un composé défini et cristallisé (voir figure 1.4). Elle cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales constituées d'un motif hexagonal en couche. Elle est précipitée à partir de la solution et représente 5 à 15 % en masse du ciment hydraté. Elle participe aux résistances à très jeune âge (dans les heures qui suivent le contact avec l'eau). Au cours de l'hydratation, elle est enrobée par les autres hydrates, c'est pourquoi sa croissance développe des contraintes internes qui pénalisent la résistance mécanique du matériau.

A l'inverse de la portlandite, le C-S-H n'est pas un « composé défini ». C'est le composé majoritaire du ciment hydraté puisqu'il représente 50 à 70 % de sa masse. Il est non stoechiométrique, mal cristallisé et de structure intermédiaire entre les cristaux et les gels (voir figure 1.5). Plus de trente phases

crystallines de cet hydrate sont connues. Elles sont toutes nommées sous le terme générique de C-S-H.

Les tirets dans l'appellation traduisent ce caractère non défini. Le C-S-H se forme sur la surface du grain de ciment. Il est constitué de polyanions silicates qui peuvent se ramifier grâce à la création de ponts calcium. Ce pontage est à l'origine de l'aptitude liante des C-S-H qui peuvent se lier aussi bien à des surfaces calciques qu'à des surfaces siliceuses. Le vocable «pont de calcium» cache une réalité beaucoup plus complexe que celle que l'on y attache habituellement en biologie par exemple. Dans les C-S-H, la contribution des forces de corrélation ionique à ce «pontage» est particulièrement importante.

C'est cette aptitude au «pontage» qui permet au C-S-H de développer la résistance de la pâte de ciment.



Fig. 1.4. Cristaux de Portlandite.

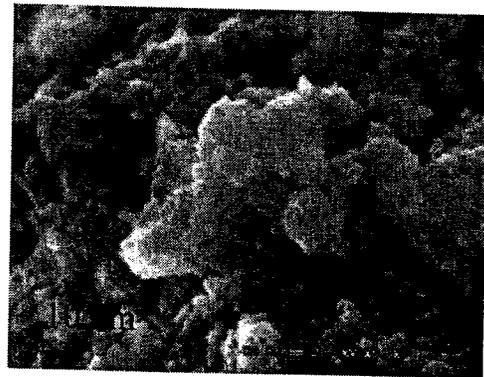


Fig. 1.5. Gel de C-S-H.

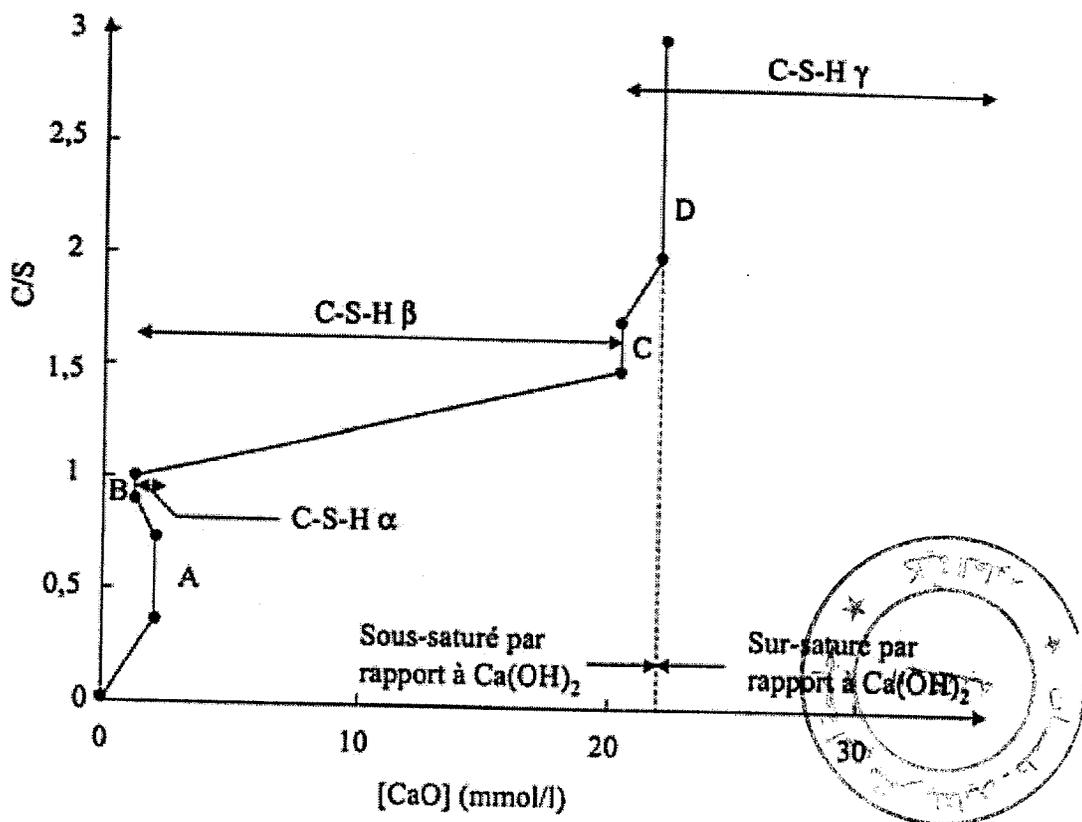
### I.1.2. L'importance du C-S-H dans l'hydratation du ciment Portland

De nombreuses études ont été menées sur la structure du  $C_3S$  et son hydratation. Elles ont montré que la stoechiométrie du C-S-H (i.e, le rapport Calcium/Silicium ou Ca/Si) dépend de la concentration en hydroxyde de calcium présente dans la solution interstitielle du ciment (voir figure 1.6).

Ainsi, Nonat et Lecoq ont proposé un modèle faisant intervenir trois phases de C-S-H distinctes, chacune correspondant à une gamme de concentrations en hydroxyde de calcium dans la solution d'équilibre. Le C-S-H $\alpha$  est en équilibre

avec une solution d'hydroxyde de calcium de concentration inférieure à 2mmol/L et de la silice hydratée. Il possède un rapport Ca/Si variant de 0,66 à 1.

Le deuxième type de C-S-H $\beta$  apparaît pour des concentrations en hydroxyde de calcium comprises entre 2 et 20 mmol/L. Il possède un Ca/Si allant de 1 à 1,5. Enfin, le C-S-H $\gamma$  en équilibre avec la portlandite apparaît pour un rapport Ca/Si compris entre 1,7 et 2. La concentration en hydroxyde de calcium est alors supérieure à 20 mmol/L.



**Fig. 1.6.** Différentes phases de C-S-H. Le point invariant A correspond à la coexistence de la silice et de la phase  $\alpha$ , le point B à la coexistence des phases  $\alpha$  et  $\beta$ , le point C à la coexistence des phases  $\beta$  et  $\gamma$ , et le point D à la coexistence de la portlandite avec la phase  $\gamma$ . Les positions respectives des points invariants C et D est à l'heure actuelle encore l'objet d'investigations, et il est probable que le point C se trouve en fait au-delà de la saturation de la portlandite à 25°C.

Le C-S-H présente une structure cristalline en feuillets, apparentée à celle de la tobermorite ou de la jennite (voir figure 1.7). Son squelette bidimensionnel

est constitué d'un double plan d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  auquel sont greffées des chaînes de silicate désordonnées. Jusqu'à  $\text{Ca/Si}=1.5$ , la structure des C-S-H peut être assimilée à une structure tobermoritique présentant des défauts. Les principaux défauts sont dûs à des lacunes en tétraèdres pontants.

Lorsque la concentration en hydroxyde de calcium augmente, l'évolution structurale consiste en un remplacement progressif des protons des tétraèdres pontants, initialement doublement protonés, par des ions  $\text{Ca}^{2+}$  (voir figure 1.8). Pour un rapport  $\text{Ca/Si}=1$ , une première phase de transition semble se produire, conduisant à l'apparition d'un nouveau type de C-S-H avec un degré de polymérisation des chaînes plus faible. Plus le rapport  $\text{Ca/Si}$  est élevé, plus le nombre de tétraèdres pontants manquants est grand et plus la longueur moyenne de chaîne est faible. L'ionisation des groupements hydroxyles des liaisons pendantes qui résulte de ce raccourcissement des chaînes maintient la charge négative des feuillets et le nombre d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'espace inter-feuillets.

Pour un rapport  $\text{Ca/Si}=1.5$ , une seconde transition semble se produire. La structure des C-S-H pour les rapports  $\text{Ca/Si}$  élevés, c'est-à-dire supérieurs à 1.5, est le point le plus controversé.

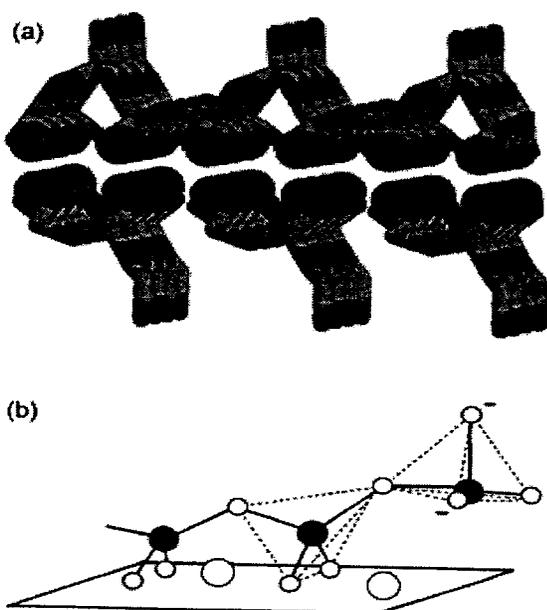


Fig. 1.7. Structure de la tobermorite qui contient un double plan d'ions calcium au centre auquel sont greffées des chaînes de silicate de chaque côté. Les unités répétitives, appelées dreierketten qui forment les chaînes, sont constituées de deux tétraèdres appariés reliés au polyèdre  $\text{CaO}$  par un sommet, et d'un tétraèdre pontant orienté dans l'autre sens. L'arrangement des tétraèdres de silice est également représenté dans les unités dreierketten.

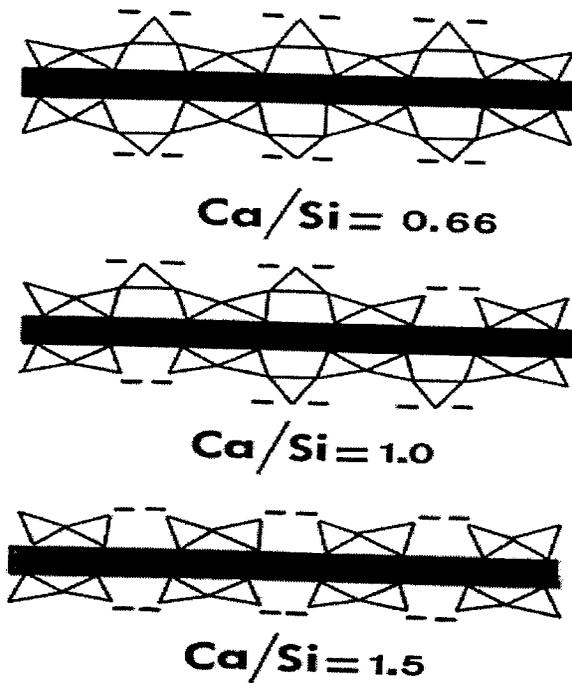


Fig. 1.8. Evolution de la structure du C-S-H lorsque le rapport Ca/Si passe de 0,66 à 1,5. Les charges électriques sont localisées à la surface des lamelles de C-S-H.

Le rapport Ca/Si moyen dans une pâte de ciment durcie tourne aux alentours de 1.7 mais il peut descendre localement à des valeurs beaucoup plus faibles. Des valeurs locales, mesurées par microscopie électronique à transmission, fluctuent ainsi entre 0.6 et 2 voire plus. Cette brève description donne une idée de la forte hétérogénéité des propriétés de surface des particules de ciment dans l'eau et de la complexité de leurs éventuelles interactions avec les molécules organiques. Compte-tenu de leur structure, les couches de C-S-H doivent porter un mélange de groupements  $\equiv\text{Si-OH}$  et  $\equiv\text{Si-O}^-$ , avec une proportion croissante de ces derniers au fur et à mesure que le rapport Ca/Si et le pH augmentent. Les feuilletts de C-S-H sont donc intrinsèquement des colloïdes chargés négativement.

Néanmoins, compte-tenu de la très forte affinité des ions  $\text{Ca}^{2+}$  pour les groupements  $\equiv\text{Si-O}^-$ , une inversion de charges peut se produire. La modélisation des courbes de titrage de C-S-H avec la chaux révèle l'existence de trois équilibres acido-basiques [25]. Au fur et à mesure de l'augmentation de la concentration en  $\text{Ca}^{2+}$  et du pH, quatre types de groupements de surface apparaissent successivement:  $>\text{SiOH}$ ,  $>\text{SiO}^-$ ,  $>\text{SiOCa}^+$  et enfin  $>\text{SiOCaOH}$ .

Parallèlement à ces observations, des mesures par électrophorèse ont montré que le potentiel zéta des C-S-H augmente avec le rapport Ca/Si. Ce dernier est déterminé par la concentration en calcium et le pH dans la solution en équilibre avec le solide.

Le potentiel zéta devient positif dès que le rapport Ca/Si est supérieur à 0.8 et donc que la concentration en ions calcium à l'équilibre est de 2 mmol/L. Cela indique que les ions calcium qui compensent la charge des feuilletts jouent un rôle essentiel sur le potentiel. A une concentration d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  à l'équilibre de l'ordre de 20 à 30 mmol/L, le potentiel zéta se situe dans la gamme 10-20 mV. Cette gamme de concentrations est couramment atteinte dans la solution interstitielle d'un ciment Portland classique. Elle correspond à des C-S-H avec les plus hauts rapports Ca/Si. Ce potentiel zéta positif prouve que, dans les silicates de calcium hydratés présents dans un ciment Portland ordinaire, tous les groupes de surface ne sont pas sous la forme neutre  $>\text{SiOCaOH}$ . Une proportion non négligeable de sites  $>\text{SiOCa}^+$  est encore présente. Sur la base de ces considérations, il est difficile de prédire à priori les propriétés de surface des particules de ciment en cours d'hydratation.

Il est cependant possible de dire que le potentiel zéta des particules de ciment Portland est généralement positif. Bien qu'il soit plus faible que celui des C-S-H à des rapports Ca/Si élevés, cela suggère que ces hydrates jouent un rôle essentiel dans les propriétés de surface.

Il faut cependant tenir compte des effets de compensation d'autres ions. Du fait de la substitution d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  par des ions  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$  dans leur réseau cristallin, les hydrates issus des phases aluminates portent intrinsèquement une charge positive, mais on ignore encore dans quelle mesure cette charge est écrantée, voire inversée, par l'adsorption d'anions comme les ions sulfates ou carbonates par exemple. Les ions sulfates jouent également un rôle particulièrement important dans les propriétés de surface des C-S-H. En effet, l'addition d'un sulfate alcalin à la solution de C-S-H à l'équilibre décale le point

de charge nulle vers des concentrations supérieures en calcium et diminue le potentiel zéta, qui peut aller jusqu'à devenir négatif pour des rapports Ca/Si faibles. Il ressort donc que la surface des silicates de calcium et des particules de ciment dans l'eau est généralement positive à cause de la couche condensée d'ions calcium  $\text{Ca}^{2+}$  à leur surface.

Cette forte concentration de calcium autour des grains de ciment partiellement hydratés est à l'origine de l'hétérogénéité de la concentration en ions calcium de la solution. Il y a donc un gradient de concentration entre la surface des grains de ciment et la solution interstitielle du ciment. Ainsi, la précipitation des hydrates, en consommant des ions de la solution, agit comme une pompe. Elle contribue à maintenir le gradient de concentration entre la surface en cours de dissolution et le sein de la solution. Lorsque nul processus particulier ne limite la vitesse de dissolution, les réactions de dissolution-précipitation se font à grande vitesse.

### **I.1.3. Evolution des propriétés mécaniques du ciment Portland**

L'hydratation du ciment Portland s'accompagne de la modification des propriétés mécaniques de la pâte. La forte augmentation de la force ionique de la solution au cours de l'hydratation est à l'origine d'une diminution de la portée de la répulsion électrostatique due à une diminution de la longueur de Debye entre les grains partiellement hydratés. C'est pourquoi, ces derniers s'agglutinent. Ce phénomène réversible est appelé coagulation. La réversibilité de ce phénomène permet à la pâte de conserver sa maniabilité pendant la période dormante. Le nombre de points de contacts et la force de l'interaction est à l'origine des propriétés rhéologiques de la pâte. Ces propriétés rhéologiques sont dominées par la fraction volumique de particules (incluant l'air) par rapport au liquide, la surface spécifique des particules et leur forme. La mesure de la contrainte en fonction du taux de cisaillement de cette pâte montre qu'il existe une contrainte seuil qui permet de casser le réseau de particules coagulées. Cette

contrainte est appelée seuil d'écoulement. Le déclenchement de la précipitation massive, qui suit la période dormante, constitue la prise du ciment. Pour certains auteurs, ce moment correspond en fait au début de la prise du ciment. Selon Bensted, le temps de prise initiale correspond à un niveau d'hydratation où les réactions chimiques, en particulier l'hydratation de l'alite pour former des C-S-H, sont assez avancées pour faire perdre une partie de sa plasticité à la pâte de ciment. La perte totale de plasticité qui correspond à la prise finale, est expliquée par une telle formation de produits d'hydratation (C-S-H), que la mobilité des grains devient très difficile.

La précipitation des hydrates se poursuit bien au-delà de la prise. Cette dernière correspond généralement à un taux d'hydratation de quelques pourcents. A mesure que les hydrates se forment, la porosité diminue et le matériau durcit.

En définitive, les propriétés des liants hydrauliques résultent de la superposition de trois types de phénomènes: un phénomène chimique (l'hydratation), un phénomène physique (la précipitation des solides) et un phénomène mécanique (la prise et le durcissement) [1].

## ***I.2. Le mortier***

### **I.2.1. Définition**

Le mortier est le mélange d'un liant (par exemple, la chaux) et d'agréats de sable avec de l'eau. Il est utilisé en maçonnerie comme élément de liaison, de scellement ou comme enduit. Les professionnels du bâtiment qui utilisent le mortier sont le maçon et le tailleur de pierre. Il existe quatre types de mortiers:

- Mortier de chaux grasse.
- Mortier de chaux hydraulique.
- Mortier de plâtre.
- Mortier de ciment Portland.

Le mélange d'un liant et d'eau se nomme la barbotine. Le mortier de chaux hydraulique et de ciment se nomme un mortier bâtard.

### **I.2.2. Mortier romain antique**

Le mélange de chaux, d'argile, de sable et d'eau est particulièrement ancien. Les Egyptiennes l'utilisaient déjà 2600 ans av. J. C: un des mortiers les plus anciens est celui de la pyramide d'Abu Roasch, qui fut certainement érigée sous la IV<sup>ème</sup> dynastie.

Le mortier romain de l'Antiquité était composé d'une partie de chaux pour trois parties de sable fin. Grâce à la chaux et au processus chimique de carbonatation, le mortier romain durcit en vieillissant, ce qui explique son extraordinaire conservation pendant des siècles.

Le mortier de tuileau est un mélange de chaux et de fragments de terres cuites de construction (briques ou tuiles). Une variété citée par Vitruve, comprend une partie de chaux, une partie de tuileau pilée et tamisée et deux parties de sable. Le tuileau, qui est une argile cuite, agit au cours de la prise du mortier:

- Tout d'abord, le tuileau fixe au cœur du mortier l'eau rendue par le début de prise.
- Dans un second temps, le tuileau rend l'eau fixée, contribuant à une prise particulièrement solide.

La systématisation de la construction en béton (opus cæmenticiu) permet les réalisations remarquables de l'architecture de l'empire romain.

### **I.2.3. Réalisation du mortier**

Dans une auge, un bac de gâchage ou une bétonnière, il faut mélanger de façon homogène ainsi qu'à sec, les matériaux solides. Puis, il faut ajouter de l'eau propre ainsi qu'à nouveau mélanger. Cette opération se nomme le gâchage.

Le mortier est une matière plastique qui fera prise au bout d'un temps variable selon l'hygrométrie ambiante et les types de mortier. Il doit être employé dès qu'il est gâché. Le mortier a fait prise quand il ne peut plus être déformé sous la pression du pouce.

### **I.2.4. Utilisation des mortiers**

Le mortier chaux grasse fait prise en contact avec l'air. Il durcit en surface et reste souple au sein de la maçonnerie. Cette qualité en fait un mortier qui reste élastique et par conséquent qui ne fissure pas. Ce mortier est employé dans la maçonnerie respectant les traditions de pierres ou de briques.

Le mortier de chaux hydraulique est fabriqué à partir de calcaire argileux. Il fait sa prise même sans contact avec l'air, sous l'eau par exemple. Ce mortier est employé dans la maçonnerie respectant les traditions de pierres ou de briques.

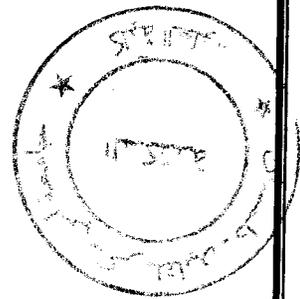
Le mortier de ciment est plus résistant que les mortiers de chaux mais il reste imperméable à l'air, donc, il maintient l'humidité dans une maçonnerie respectant les traditions de pierres qui doit toujours être aérée. Ce mortier doit être utilisé seulement pour la maçonnerie des parpaings de ciment [3].

#### **I.4. Conclusion**

Le ciment Portland reste en fait le liant le plus utilisé au monde de part ses caractéristiques intéressantes comme nous l'avons déjà vu. Cependant, il peut être allié à certains matériaux pour changer ses propriétés physico-mécaniques et ainsi l'utiliser pour certaines applications bien précises.

# Chapitre III

# Les plastiques



## *II. Les plastiques*

### **II.1. Définition**

Une matière plastique ou en langage courant un plastique désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. Le mot « plastique » dérive de plasticité.

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. On peut observer aujourd'hui sur un même matériau des propriétés qui n'avaient jamais auparavant été réunies, par exemple la transparence et la résistance aux chocs.

Les textiles (fils et fibres) ainsi que les élastomères ne sont pas des matières plastiques proprement dites.

Généralement, les polymères industriels ne sont pas utilisés à l'état « pur », mais mélangés à des substances miscibles ou non dans la matrice polymère.

Structure typique d'une formule: matière plastique = polymère brut de base + charges + plastifiant(s) + additifs.

Il existe un grand nombre de matières plastiques; certaines connaissent un grand succès commercial. Les plastiques se présentent sous de nombreuses formes: pièces moulées par injections, tubes, films, fibres, tissus, mastics, revêtements, etc. Ils sont présents dans de nombreux secteurs, même dans les plus avancés de la technologie.

### **II.2. Types de plastiques**

De nombreux types de polymères nous sont familiers en raison de leurs multiples applications, qu'il s'agisse des plastiques, des élastomères (ou caoutchoucs), des fibres, des revêtements, des adhésifs, des mousses ou des pellicules. Un polymère donné peut même, selon ses propriétés, servir à plus

d'une de ces applications. Par exemple, un plastique, s'il est réticulé et utilisé à une température supérieure à sa température de transition vitreuse, peut être un élastomère satisfaisant, tout comme un matériau fibreux non étiré en filaments peut donner un plastique approprié. Le présent chapitre expose brièvement les deux fameux types de polymère souvent utilisés dans la vie courante.

On distingue deux grandes familles de plastiques:

- *les thermoplastiques.*
- *les thermodurcissables.*

### **II.2.1. Les thermoplastiques**

Les thermoplastiques, sous l'action de la chaleur, fondent et reprennent leur rigidité en refroidissant. Cette propriété permet de les recycler sous forme de matière première.

Il existe différents types de thermoplastiques:

- le polychlorure de vinyle (PVC).
- le polyéthylène (PEhd et PEbd).
- le polypropylène (PP).
- le polystyrène (PS).
- le polytéréphtalate d'éthylène (PET).

Qui sont particulièrement utilisés dans la fabrication des emballages, et:

- L'acrylonitrile butadiène styrène (ABS).
- les polyamides.
- les polycarbonates.
- les polyacryliques.
- le polyuréthane (PU).

Qui sont généralement utilisés dans les applications techniques.

Les thermoplastiques représentent 80 % du tonnage des déchets en plastique.

### **II.2.2. Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables sont infusibles et ne peuvent donc pas être recyclés sous forme de matière première. Leur valorisation se limite à l'incinération et, de façon très ponctuelle, à une utilisation comme charges dans les résines vierges. Il s'agit des polyesters insaturés, du polyuréthane réticulé et de la bakélite. Les thermodurcissables représentent 20 % du tonnage des déchets en plastique. Les déchets en plastique ont des origines diverses: déchets de la transformation, emballages usagés de l'industrie et des centres de grande distribution, déchets de démolition ou de réfection, déchets de produits électriques et électroniques en fin de vie, contenus d'automobiles hors d'usage, films agricoles, déchets d'ordures ménagères...

Les déchets plastiques sont valorisables par récupération d'une partie importante de la matière (recyclage et régénération) ou par utilisation de leur pouvoir calorifique.

### **II.3. La valorisation matière**

La diversité des plastiques (on compte une centaine de familles de polymères, chacune déclinée en de nombreux grades de propriétés et représentant au total mille produits commerciaux) entraîne souvent des difficultés techniques dans les opérations de recyclage ou de régénération.

#### **II.3.1. Le recyclage mécanique des thermoplastiques**

Le recyclage mécanique consiste à refondre la matière pour fabriquer des produits commercialisables. Les déchets sont lavés, broyés puis directement

transformés en produits finis ou bien en granulés alors commercialisés en concurrence avec les granulés de résine vierge. Les déchets thermoplastiques peuvent être valorisés directement par l'entreprise qui les a produits; c'est d'ailleurs souvent le cas chez les fabricants de films. Mais le débouché le plus important reste leur commercialisation sur le marché des résines.

Le recyclage mécanique est extrêmement simple quand les plastiques sont constitués d'une seule résine. Les déchets sont broyés puis ajoutés aux granulés de résine vierge avant la plastification. Mais, le recyclage pose des problèmes quand les plastiques sont de compositions différentes puisqu'ils ne sont généralement pas compatibles entre eux. Les températures de transformation sont en effet différentes et le mélange de plusieurs plastiques entraîne une diminution de la qualité des caractéristiques mécaniques du produit final. Deux polymères de même nature chimique mais de configuration différente peuvent également être incompatibles, comme par exemple les bouteilles de lait et les flacons de détergents en PEhd.

Il existe cependant des unités qui recyclent des plastiques en mélange. Ces plastiques viennent en substitution du bois ou du béton pour la réalisation de piquets, de mobilier d'extérieur, de caillebotis, de conteneurs... Ces débouchés sont baptisés bas de gamme et intéressent principalement les fabricants de pièces massives pour lesquelles la quantité de matière utilisée vient compenser la diminution de la qualité du plastique.

### II.3.2. Le recyclage chimique

Le recyclage chimique consiste à décomposer les macromolécules constitutives des polymères en matières premières réutilisables. Les matières plastiques sont dépolymérisées sous l'effet de la chaleur et/ou d'un composé chimique. Selon le procédé utilisé, la valorisation permet de revenir au monomère de départ ou aux produits pétrochimiques de base.

Les procédés thermiques sont les seuls envisageables pour le recyclage des polymères en leurs monomères. Ils sont peu adaptés aux déchets en mélange et constituent la seule voie de dépolymérisation des polyoléfines, du PVC (polychlorure de vinyle), du PS (polystyrène) ou du PMMA (Polyméthacrylate de méthyle). Cependant, les conditions technico-économiques de mise en oeuvre au stade industriel étant défavorables, ils ne sont développés qu'à l'échelle du laboratoire.

Les techniques de dissolution présentent l'avantage de s'appliquer, à priori, à tous les types de plastiques et même aux mélanges. Les conditions technico-économiques sont meilleures que celles régissant les procédés thermiques et on obtient des produits de meilleure qualité que ceux issus du recyclage mécanique.

L'exploitation industrielle du recyclage chimique compte, entre autre, une unité de transformation de déchets de PET (bouteilles uniquement) en France, et une unité de recyclage de PVC en Italie, notamment de matériaux complexes telles les enductions PVC sur textile.

### **II.3.3. Les autres modes de valorisation matière**

Les emballages industriels, tels que les palettes de transport, les caisses de livraison ou de déménagement, offrent de nombreuses opportunités de réemploi. Les déchets plastiques peuvent également être utilisés en tant que charge:

- utilisation des plastiques thermodurcissables en substitution des charges minérales.
- utilisation des déchets de polystyrène expansé dans certains bétons ou briques ce qui permet l'allègement du matériau.

- ajout de déchets thermoplastiques dans la constitution des revêtements routiers, ce qui permet d'améliorer les performances de l'enrobé, en particulier sa résistance à la fissuration et à l'orniérage.

La valorisation matière des plastiques implique une chaîne d'opérations et de professionnels spécialisés dans:

- la collecte (récupérateurs, négociants).
- la préparation (lavage, tri, broyage).
- la transformation (régénération par re-granulation).
- le recyclage (fabrication de nouveaux produits).

Les déchets de pré-consommation, bénéficiant de filières bien rodées, connaissent un taux de recyclage important. Par contre, malgré un maillage de plus en plus dense de la collecte sélective dans les communes et des actions d'éco-emballages, il reste encore un potentiel très important de valorisation des plastiques contenus dans les ordures ménagères. C'est également le cas pour les produits en plastiques collectés.

La difficulté de valoriser ces déchets de post-consommation est inhérente à:

- l'hétérogénéité des produits.
- la dissémination des gisements.
- les limites techniques du tri.
- le degré de contamination des produits.
- le prix des cours de la résine vierge.

La place croissante des plastiques dans les équipements (automobiles, informatiques..) et la mise en oeuvre des nouvelles réglementations (véhicules hors d'usage, déchets d'équipements électriques et électroniques), imposant des objectifs de recyclage très élevés, devraient au moins dans un premier temps augmenter les volumes de collecte.

#### II.4. La valorisation énergétique

Le pouvoir calorifique des plastiques est identique à celui du fioul et du charbon. Ce sont donc des matières combustibles tout à fait intéressantes, sous réserve de la mise en oeuvre d'équipements spécifiques à la récupération d'énergie et au traitement des fumées dégagées.

La valorisation énergétique des plastiques est possible dans les usines d'incinération d'ordures ménagères avec récupération d'énergie et les cimenteries. Cependant, les équipements sont souvent insuffisants et, de surcroît, les incinérateurs ne sont pas tous équipés de récupérateurs d'énergie. De plus, l'incinération de quantités importantes de plastiques occasionne des surchauffes.

#### II.5. Caractéristiques des plastiques

Les propriétés des matériaux plastiques ne cessent de s'améliorer ; ils ont perdu leur mauvaise réputation.

On constate l'emploi grandissant de pièces en matières plastiques à la place de pièces métalliques, souvent plus onéreuses, plus sensibles à la corrosion, ou plus lourdes. Certaines caractéristiques techniques diffèrent notablement de celles des métaux:

- densité des matières plastiques non expansées est nettement plus faible que celle des métaux: de 0,83 (cas du poly-4-méthyl-pentène-1 désigné par PMP) à 2,15 (PTFE), avec 1,2 comme valeur moyenne. La densité d'un polymère est directement fonction du taux de cristallinité. Par ailleurs, la rigidité et la résistance mécanique augmentent avec ce taux.
- température de transformation plus basse: couramment comprise entre 100 °C (le PS est facile à travailler: extrudable dès 85 °C) et 300 °C (le PC est injecté vers 300 °C). Les bioplastiques sont transformés de

160 à 200 °C, contre environ 220 °C pour des compounds ordinaires équivalents.

- élasticité plus élevée (jusqu'à 800 % d'élongation à la rupture pour le PEHD).
- thermostabilité des polymères thermoplastiques nettement inférieure à celle des métaux. Rares sont les plastiques résistant à plus de 250 °C pendant de longues périodes dans l'air. Des modifications structurales, particulièrement parmi les matières thermoplastiques, permettent d'élargir le domaine thermique d'utilisation vers les basses ou hautes températures.
- plus faible (le module du PEBD est peu élevé:  $E \sim 200$  MPa; à l'opposé, les aminoplastes présentent un module très élevé). Une incorporation croissante de fibres augmente le module d'élasticité et la contrainte à la rupture (ténacité) du composite. La dilatation thermique des matériaux est inversement proportionnelle à leur module de traction. Le coefficient de dilatation des polymères thermoplastiques est supérieur à celui des métaux.
- tenue (ou résistance) aux agents chimiques: en règle générale, les polymères résistent aux acides et aux bases [grande inertie chimique du PTFE et du PE (en raison de sa structure paraffinique)]. Ils sont cependant sensibles aux solvants (bonne tenue du PTFE, PBT et PA-6,6).
- les polymères ont un comportement viscoélastique. En effet, ils démontrent simultanément des propriétés élastiques et un caractère visqueux. Dans ce dernier cas, la matière s'écoule en réponse à une contrainte.
- certains plastiques sont des amortissants vibratoires; exemples: ABS, copolymère bloc SIS [ou poly (styrène-b-isoprène-b-styrène)]... ; intérêt en vibroacoustique.
- la plupart des polymères thermoplastiques amorphes non chargés (et non colorés...) sont transparents (PMMA, PC, PS « cristal », etc.).

- certains plastiques manifestent une grande résistance à l'impact (PC, PET, PMMA, etc.).
- certains sont résistants à l'abrasion (PTFE, PVC rigide, polyamides, PET, aminoplastes, etc.). Le PTFE possède un coefficient de friction particulièrement faible qui lui permet d'être un lubrifiant solide.

Les matrices organiques sont des isolants thermiques et électriques, ainsi que les fibres de renfort (sauf fibres de carbone):

- la conductivité thermique des polymères est environ cent fois plus faible que celle des métaux; ainsi, beaucoup de matières plastiques, en particulier les mousses, sont utilisées comme isolants.
- conductivité électrique très faible; les plastiques servent traditionnellement pour l'isolation de fils et câbles électriques (PTFE, PEHD).

Code	Densité	Taux de cristallinité (%)	Tg (°C)	T <sub>f</sub> ou T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>maxi</sub> (°C)	Module E (GPa)
ABS	1.04-1.12	0	85-125	105-120	70-85	2.5
PA-6	1.13	50	52	215	85	1
PA-6,6	1.14	50	57	260	90	1.5
PC	1.20	0	150	220-250	120	2.4
PE-HD	0.95	80-95	-110	124-135	90	0.8-1.2
PE-LD	0.92	50-70	-110	100-125	70	0.15-0.3
PET amorphe	1.30	0	65-80	255	100	2.7
PET cristallin	1.40	40	65-80	260	100	4.1
PMMA	1.18	0	105	100	60-90	3
PP	0.91	60-70	-10	165	100	1.3
PS « cristal »	1.05	0	80-100	100	60	3.2
PVC rigide	1.38	0-5	80	100-120	65	2.4

**Tab. 2.1.** Caractéristiques physiques moyennes de quelques polymères thermoplastiques usuels.

## II.6. Conclusion

Les matières plastiques occupent une place importante dans l'ensemble des produits de consommation. Elles offrent plusieurs avantages, comme la diminution du poids des emballages pour le transport, une bonne protection des produits et des possibilités quasi infinies de formes et de couleurs. Toutefois, certains organismes environnementaux accusent les plastiques de polluer l'environnement. En effet, la difficulté de leur stockage ou leur transformation a amené des chercheurs à leur trouver une place dans le cadre du développement durable en les réinjectant par exemple dans une matrice de ciment pour obtenir un matériau composite de propriétés désirées.

# Chapitre III

## Les composites

## III. Les composites

### III.1. Introduction

De nombreuses technologies modernes font appel à des matériaux dotés de propriétés que ne peuvent offrir les matériaux traditionnels (métaux, céramiques et polymères). C'est le cas pour certains matériaux utilisés dans l'industrie aérospatiale, la construction automobile et la fabrication d'appareils de plongée. Les ingénieurs en aéronautique, notamment, recherchent de plus en plus des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion: une combinaison de propriétés assez exceptionnelle. Les matériaux résistants sont souvent relativement denses et une augmentation de la résistance et de la rigidité fait généralement diminuer la résilience.

La gamme de propriétés des matériaux disponibles s'étend au rythme du développement de la famille des matériaux composites. Grosso modo, un composite est un matériau multiphasé qui combine les propriétés de ses composants. Selon le principe de combinaison des propriétés, les propriétés d'un composite sont plus intéressantes que celles des matériaux qui le constituent. Cependant, maints composites sont le résultat d'un compromis entre les propriétés recherchées.

Nous y distinguons trois catégories principales: les composites renforcés par des particules, les composites renforcés par des fibres et les composites structuraux [2].

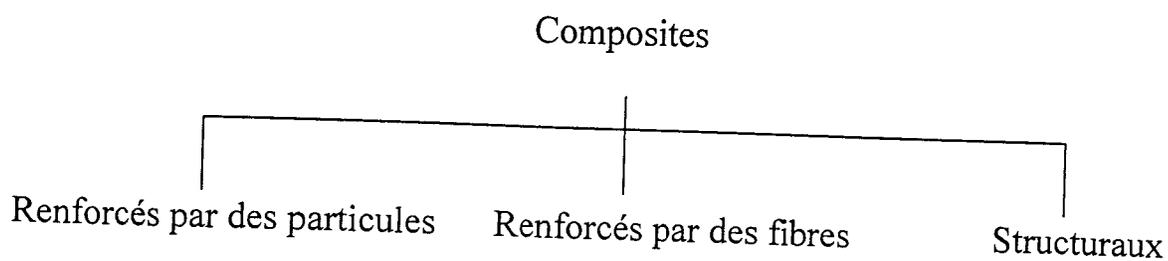


Fig. 3.1. Types de composites.

### III.1.1. Composites renforcés par des particules

La catégorie des composites renforcés par des particules comprend les composites à grosses particules et les composites renforcés par dispersion. Ces deux types de composites diffèrent par leur mécanisme de renforcement [2].

#### III.1.1.1. Composites à grosses particules

Les interactions entre les particules et la matrice ne sont d'ordre ni atomique ni moléculaire, elles relèvent de la mécanique classique. Les particules de renfort de ces composites sont souvent plus dures et plus rigides que la matrice et ont tendance à l'empêcher de se déplacer autour d'elles. Donc, essentiellement, la matrice transmet aux particules une partie des contraintes qu'elle subit et le degré de renforcement des propriétés mécaniques dépend de la force de liaison entre la matrice et les particules. Certains polymères à charges ajoutées sont assimilables aux composites à grosses particules. Ces charges modifient ou améliorent les propriétés des polymères et, comme elles sont moins chères que ceux-ci, on les utilise souvent pour réduire le coût du produit fini. Le béton est également un composite à grosses particules puisqu'il est constitué de ciment (matrice), de sable et de gravier (granulats) [2].

#### III.1.1.2. Composites renforcés par dispersion

Les composites renforcés par dispersion renferment des particules généralement beaucoup plus petites, leur diamètre étant de l'ordre de  $0,01 \mu\text{m}$  à  $0,1 \mu\text{m}$  (10 nm à 100 nm). Dans ces composites, les interactions matrice-renfort qui produisent le renforcement surviennent à l'échelle atomique ou moléculaire. Dans les deux cas, la matrice supporte la majeure partie de la charge appliquée et les petites particules dispersées freinent le déplacement des dislocations. Cela restreint la déformation plastique et accentue donc la résistance à la traction, la limite d'élasticité et la dureté [2].

### III.1.2. Composites renforcés par des fibres

Les composites les plus importants sont ceux à renfort constitué de fibres. La technologie moderne exige des matériaux de faible densité et à propriétés mécaniques accentuées. Les propriétés le plus souvent recherchées dans un composite renforcé par des fibres sont la résistance et la rigidité alliées à la légèreté, ce qui explique la caractérisation fréquente des composites à fibres par leurs propriétés spécifiques, c'est-à-dire leurs propriétés mécaniques rapportées à leur densité. La résistance spécifique et le module spécifique correspondent respectivement à la résistance à la traction et au module d'élasticité par rapport à la masse volumique. Certains matériaux de faible densité permettent la fabrication de composites à résistance et à module spécifiques exceptionnellement élevés [2].

### III.1.3. Composites structuraux

En général, un composite structural est constitué d'un matériau homogène et d'un matériau composite. Ses propriétés dépendent de celles de ses constituants et de leur géométrie. Les composites stratifiés et les structures en sandwich sont les composites structuraux les plus courants; en voici, une brève description [2].

## III.2. Le composite polymère/ciment

L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats ainsi qu'à l'obligation de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes. Afin de mieux préserver l'environnement, plusieurs actions de valorisation ont été entreprises, notamment dans le domaine des matériaux de construction. A ce sujet, plusieurs travaux concernant l'emploi de granulats de polymère ont été réalisés. Ces derniers ont montré l'intérêt de l'association ciment/polymère dans l'élaboration de composites cimentaires à haute

déformabilité. D'autres travaux sur la durabilité de ces composites ont également montré l'importance du type de copolymère ABS sur leur comportement en conditions climatiques sévères. Toutefois, la plupart des études de ce domaine se sont intéressées à la valorisation de granulats de polymère. Le présent travail a pour but de contribuer à leur valorisation par leur incorporation dans une matrice cimentaire, en vue de l'utilisation du composite élaboré dans le domaine d'application des bétons légers [3].

### III.3. Conclusion

Il existe plusieurs catégories de composites. Leur comportement dépend des caractéristiques, des proportions, de la géométrie, de la répartition et des propriétés de leurs composants. La maîtrise de ces données permet de combiner divers types de matériaux pour obtenir des composites ayant des propriétés supérieures à celles des alliages métalliques, des céramiques et des polymères.

# Chapitre IV

## Partie pratique

## ***IV. Partie pratique***

### **IV.1. Réalisation des éprouvettes**

Les éprouvettes étudiées sont réalisées dans le Laboratoire RDM (Résistances des matériaux) du département de Génie Civil de la faculté de technologie (pôle Chetouane).

#### **IV.1.1. Matériel utilisé**

- La température du laboratoire est estimée à  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- Un malaxeur normalisé (voir figure 4.2).
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée  $4\text{cm} \times 4\text{cm}$  et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelées “éprouvettes  $4 \times 4 \times 16$ ”) (voir figure 4.1).
- Un appareil à chocs permettant d’appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d’une hauteur de  $15\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$  à la fréquence d’une chute par seconde pendant 60 s (voir figure 4.3).
- Une machine d’essais de résistance à la flexion permettant d’appliquer des charges jusqu’à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de  $50 \text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$ .
- Une machine d’essais à la compression permettant d’appliquer des charges jusqu’à 150 KN (ou plus si les essais l’exigent) avec une vitesse de mise en charge de  $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$ . Cette machine est équipée d’un dispositif de compression.
- Une étuve.

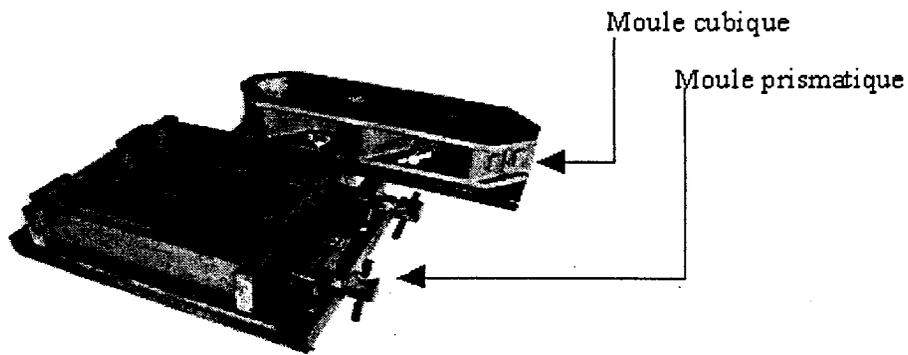


Fig. 4.1. Moules pour moulage des éprouvettes de mortier.

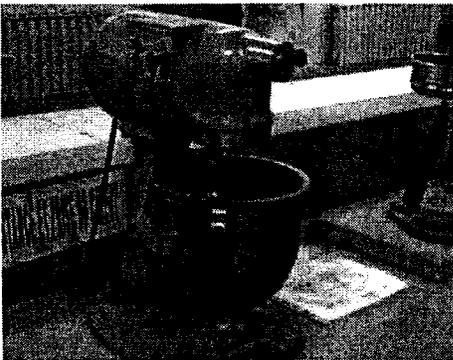


Fig. 4.2. Malaxeur.

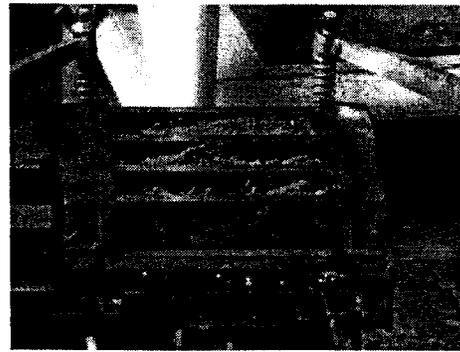


Fig. 4.3. Dame de chocs.

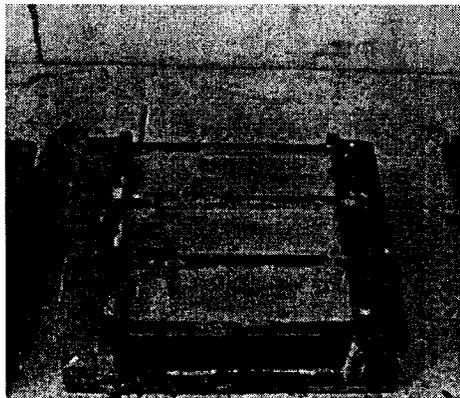


Fig. 4.4. Moule de mortier/polymère ABS.

#### IV.1.2. Matériaux utilisés

- Ciment Portland: Le ciment utilisé est un CPJ 42,5 ramené de la cimenterie de Beni-saf, caractérisé par une masse volumique apparente  $M_{v, app} = 1114,8 \text{ kg/m}^3$ .

- **Sable:** sable de l'UNG dont l'indice du Djebel ABIOD fait l'objet d'une prospection détaillée. Le Djebel ABIOD se situe à 28 Km au nord-est de la ville de Tlemcen, sur la route nationale N°53 et à 4 Km au sud de la localité de Sidi Abdelli. Les coordonnées Lambert sont:  $x=19450$  et  $y=199.50$ . Le sable est tamisé au moyen d'un tamis de 2mm.
- **Polymère:** copolymère ABS (Acrylonitrile, Butadiène, Styène) récupéré à l'usine de la SONELEC de Tlemcen de masse volumique apparente  $720 \text{ Kg/m}^3$ .
- **Eau:** eau naturelle (eau de robinet).

### IV.1.3. Travail effectué

#### IV.1.3.1. Préparation du matériau

Il est recommandé d'utiliser les doses de sable normalisé. Dans le cas où ce dernier n'est pas disponible, il est possible de le reconstituer au laboratoire. Il faudra tamiser à sec un sable en utilisant à cet effet une colonne de tamis normalisée et reconstituer le sable normalisé en s'assurant que sa courbe granulométrique se situe bien dans le fuseau.

Préparer le mélange sable/polymère ABS avec des doses de 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60% en volume du polymère par rapport à celui du sable (voir tableau 4.1).

teneurs volumiques en polymère ABS (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Poids de ABS (g)	0	60	120	180	240	300	360
Poids de sable (g)	1350	1215	1080	945	810	675	540

**Tab. 4.1.** Les doses utilisées dans les mélanges.

### IV.1.3.3. Mode opératoire

#### IV.1.3.3.1. Préparation du mélange

Mélanger le sable normalisé 0% (pour les autres teneurs en particules de polymère ABS 10, 20, 30, 40, 50 et 60%, on mélange le sable avec le polymère ABS) avec le ciment à tester et l'eau dans les proportions suivantes:  $450 \pm 2$  g de ciment (constant dans toutes les doses), différentes teneurs de sable/polymère ABS (voir tableau 4.1) et  $225 \pm 1$  g d'eau (constant dans toutes les doses).

Avant d'être utilisé pour l'identification des caractéristiques physiques et/ou mécaniques, ce mortier/polymère ABS est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme: introduire l'eau en premier dans la cuve du malaxeur; y verser ensuite le ciment; aussitôt après, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente.

Après 30 s de malaxage, introduire régulièrement le sable pendant les 30s suivantes. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires. Arrêter le malaxeur pendant 1 min 15 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s. Verser le mortier / polymère prêt dans des moules prismatiques 4x4x16 cm (voir tableau 4.2).

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30 s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

Tab. 4.2. Opération pour déterminer le mortier normal.

#### IV.1.3.3.2. Confection des éprouvettes

- Installer le moule sur l'appareil à chocs.
- Le remplir en 2 fois puis le soumettre à chaque fois à 60 chocs (voir figure 4.3).
- Araser la surface.

#### IV.1.3.3.3. Démoulage des éprouvettes

Après 24 heures, étiquetage et stockage dans le bac d'eau. On pèse les éprouvettes avant de les mettre dans le bac d'eau. Nettoyage du moule et huilage.



Fig. 4.5. Démoulage des éprouvettes.

### IV.2. Essais destructifs

#### IV.2.1. Objectif de l'essai

Il s'agit de définir les qualités de résistance d'un ciment plutôt que d'un mortier / polymère ABS.

### IV.2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression d'éprouvettes de mortier normal et de mortier/polymère ABS. Dans un tel mortier, la seule variable est la nature de liant hydraulique; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment et des particules de polymère ABS.

### IV.2.3. Conduite de l'essai

La norme EN 196-1 (voir Annexe II) décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Avec le mortier / polymère ABS préparé (comme indiqué précédemment), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du mortier / polymère dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier / polymère en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, puis recouvert d'une plaque de verre et ensuite entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à  $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. Les normes ENV 197-1 et NFP 15-301 définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 2 (ou 7 jours) et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le tableau ci-dessous.

<b>Age</b>	24 h	48 h	72 h	7 j	28 j
<b>Précision</b>	$\pm 15\text{ min}$	$\pm 30\text{ min}$	$\pm 45\text{ min}$	$\pm 2\text{ h}$	$\pm 8\text{ h}$

**Tab. 4.3.** Les limites de temps par rapport à l'âge.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure 4.6.

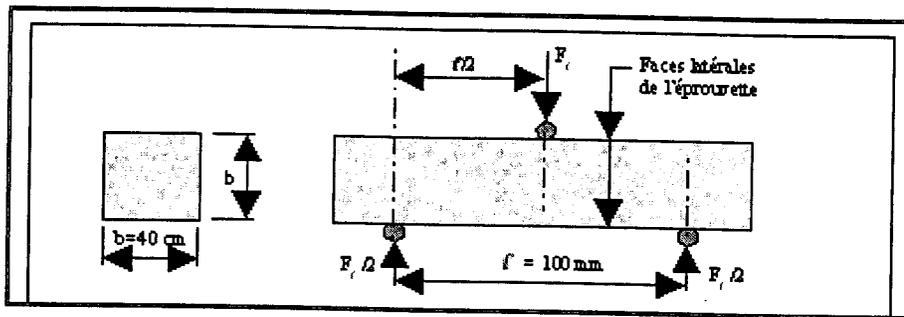


Fig. 4.6. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f l/4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est:

$$R_f = \frac{1,5 F_f l}{b^3}$$

Cette contrainte est appelée la résistance à la flexion. Compte-tenu des dimensions  $b$  et  $l$ , si  $F_f$  est exprimée en kilonewtons (KN), cette résistance, exprimée en Mégapascals (MPa), vaut:

$$R_f(\text{MPa}) = 0.234 F_f(\text{KN}).$$

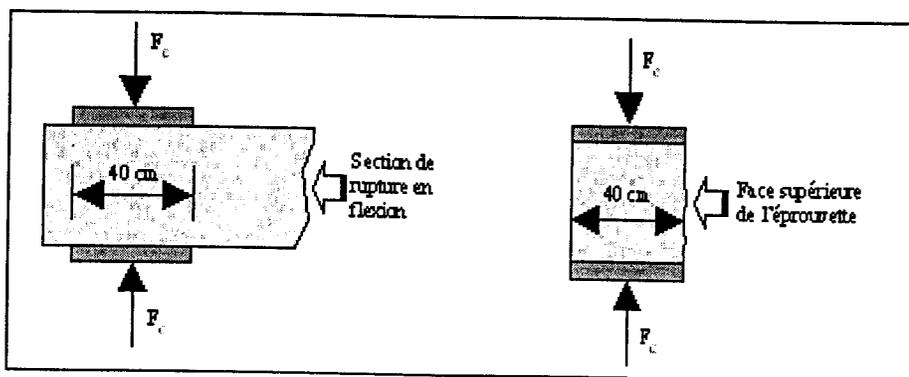


Fig. 4.7. Dispositif de rupture en compression.

Les demis-prismes de l'éprouvette, obtenus après rupture en flexion, seront rompus en compression comme il est indiqué sur la figure 4.7. Si  $F_c$  est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si  $F_c$  est exprimée en Newtons, cette résistance exprimée en Mégapascals s'écrit:

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

Les résultats, obtenus pour chacun des 6 demi-prismes, sont arrondis à 0.1 MPa près et on en fait la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de  $\pm 10\%$  de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de  $\pm 10\%$  de cette nouvelle moyenne, la série des 6 mesures est écartée. Lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré.

#### **IV.2.4. Résistance normale**

La résistance dite normale pour un ciment donné est la résistance ainsi mesurée à l'âge de 28 jours. C'est cette résistance qui définit la classe du ciment: si, à 28 jours, un ciment a une résistance normale de 52 MPa, on dira que sa classe vraie est de 52 MPa.

### **IV.3. Résultats expérimentaux et analyses**

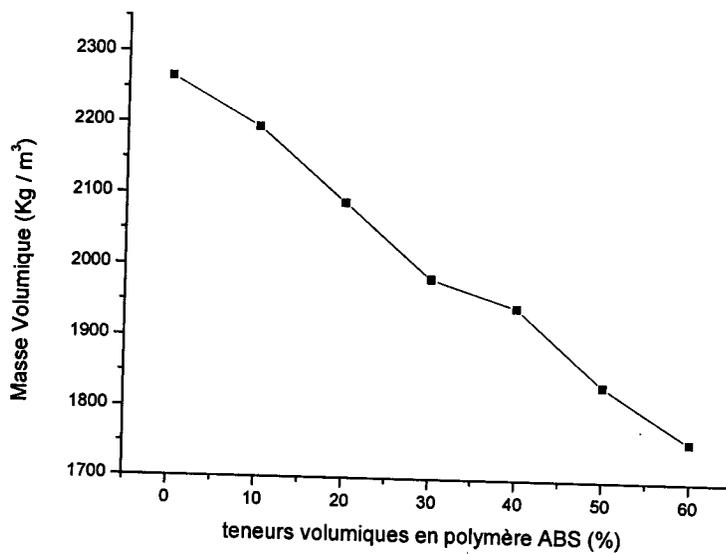
#### **IV.3.1. Allègement du matériau**

Avant les essais, les échantillons ont été séchés dans une étuve à  $50 \pm 2^\circ\text{C}$ . Les volumes des éprouvettes sont constants et égaux à  $256 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  et les propriétés des matériaux à l'état frais sont rassemblées dans le tableau 4.3.

teneurs volumiques en polymère ABS (%)	0	10	20	30	40	50	60
Masse (Kg)	0.580	0.562	0.535	0.508	0.498	0.470	0.450
Masse Volumique (Kg / m <sup>3</sup> )	2265.6	2195.3	2089.8	1984.3	1945.3	1835.9	1757.8

**Tab. 4.3.** Allègement du matériau.

La variation de la masse volumique sèche du composite, en fonction de la teneur en particules de polymère ABS, est donnée par la courbe de la figure 4.8. Celle-ci diminue avec l'augmentation de la teneur en polymère ABS. Elle varie de 2265.6 à 1757.8 kg/m<sup>3</sup>, pour une teneur en particules d'ABS allant de 0% (mortier de référence) à 60% ; Ce qui correspond à un allègement de l'ordre de 22.41%, particulièrement utile dans les travaux de réhabilitation et l'allègement des structures.



**Fig. 4.8.** Allègement du matériau.

IV.3.2. Résistances mécaniques (compression - traction par flexion)



Fig. 4.9. Machine d'essais de résistance

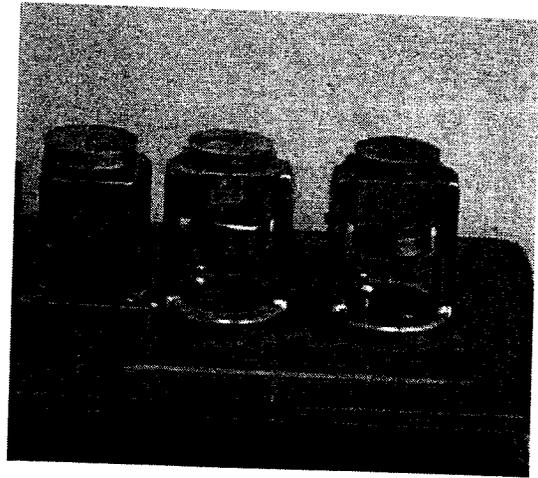


Fig. 4.10. Accessoires des essais de mortier

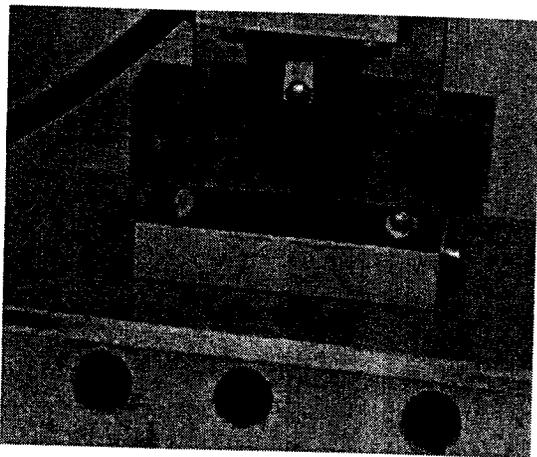


Fig. 4.11. Essai de traction par flexion

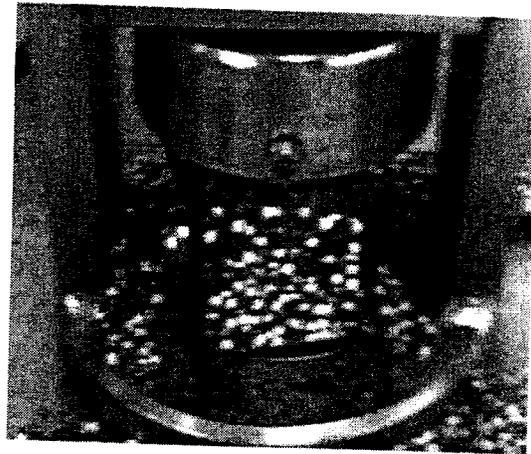


Fig. 4.12. Essai de compression

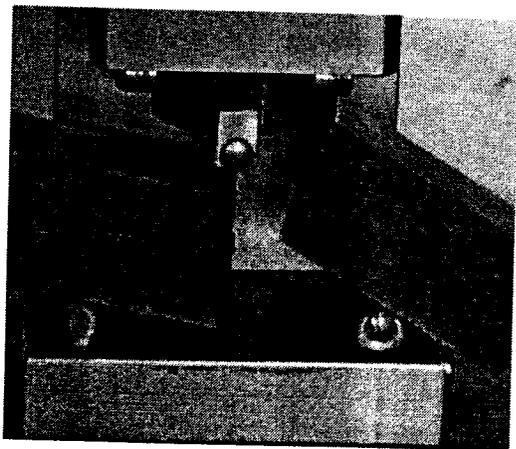


Fig. 4.13. Rupture brusque

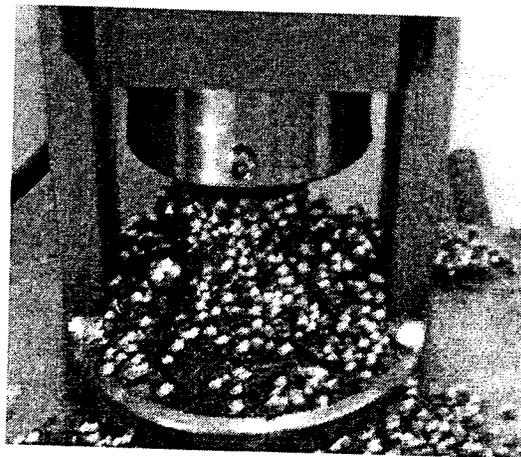


Fig. 4.14. Rupture conique

### IV.3.2.1- Résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion du composite (voir figure 4.11), à 7, 14 et 28 jours à différents teneurs en particules de polymère ABS, est illustrée par les tableaux 4.5 à 4.7.

teneur volumique en polymère ABS (%)	0	10	20	30	40	50	60
Charge de rupture en flexion $F_f$ (KN)	3.30	3.27	2.70	2.36	2.16	2.00	1.68
Contrainte de rupture en flexion $R_f$ (MPa)	0.772	0.765	0.631	0.552	0.505	0.468	0.393

**Tab. 4.5.** Résistance à la traction par flexion à 7 jours.

Teneur volumique en polymère ABS (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Charge de rupture en flexion $F_f$ (KN)	3.80	3.20	2.90	2.70	2.50	2.20	1.90
Contrainte de rupture en flexion $R_f$ (MPa)	0.889	0.748	0.678	0.632	0.585	0.515	0.444

**Tab. 4.6.** Résistance à la traction par flexion à 14 jours.

Teneur volumique en polymère ABS (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Charge de rupture en flexion $F_f$ (KN)	4.10	3.60	3.10	2.90	2.60	2.20	2.10
Contrainte de rupture en flexion $R_f$ (MPa)	0.960	0.842	0.725	0.678	0.608	0.515	0.491

**Tab. 4.7.** Résistance à la traction par flexion à 28 jours.

### IV.3.2.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression du composite (voir figure 4.12) à 7, 14 et 28 jours, à différentes teneurs en particules de polymère ABS, est donnée par les tableaux 4.8 à 4.10.

Teneur volumique en polymère ABS (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Charge de rupture en compression $F_r$ (KN)	52.6	49.1	45.6	40.2	38.4	32.1	30.2
Contrainte de rupture en compression $R_f$ (MPa)	32.87	30.68	28.50	25.12	24.00	20.06	18.87

**Tab. 4.8.** Résistance à la compression à 7 jours.

Teneur volumique en polymère ABS (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Charge de rupture en compression $F_r$ (KN)	54.8	52.7	50.6	44.9	41.6	35.1	32.9
Contrainte de rupture en compression $R_f$ (MPa)	34.25	32.93	31.62	28.06	26.00	21.93	20.56

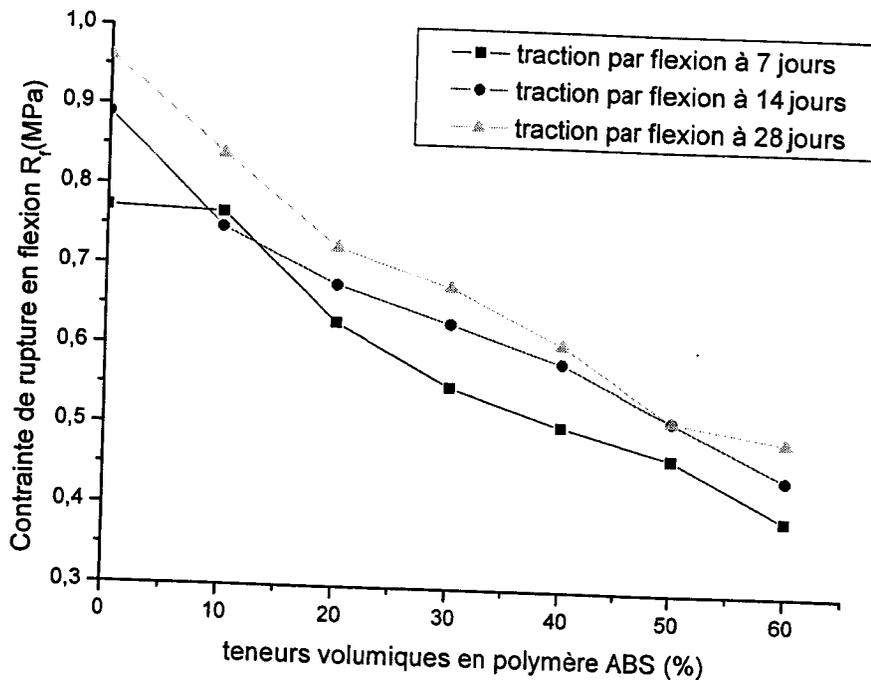
**Tab. 4.9.** Résistance à la compression à 14 jours.

Teneur volumique en polymère ABS (%)	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Charge de rupture en compression $F_r$ (KN)	69.3	64.1	60.4	53.3	51.7	50.3	46.0
Contrainte de rupture en compression $R_f$ (MPa)	43.31	40.06	37.75	33.31	32.31	31.43	28.75

**Tab. 4.10.** Résistance à la compression à 28 jours.

### IV.3.2.3. Description du comportement physico-mécanique du mortier

Les variations de la résistance à la traction par flexion du composite à 7, 14 et 28 jours, à différentes formulations, sont regroupées sur la figure qui permet d'accéder à la contrainte de rupture en flexion pour différentes teneurs volumiques en copolymère ABS (voir figure 4.15).



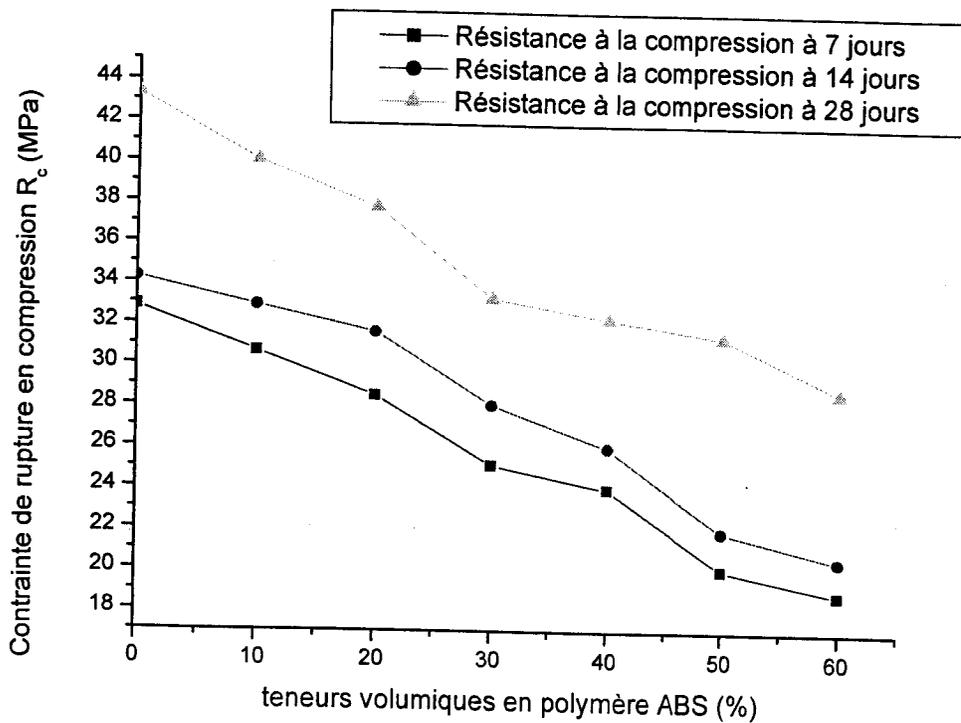
**Fig. 4.15.** Résistance à la traction par flexion des composites.

La résistance diminue notablement avec l'augmentation de la teneur en particules de polymère ABS. Pour une composition allant de 0 à 60%, la résistance à la traction par flexion varie :

- Pour le 7<sup>ème</sup> jour, de 0,772 MPa, pour le mortier de référence, à la valeur de 0,393 MPa (correspondant à 60% en copolymère ABS), soit une réduction de l'ordre de 49,09%.

- Pour le 14<sup>ème</sup> jour, de 0.889 MPa, pour le mortier de référence, à 0.444 MPa (correspondant à 60% en copolymère ABS), soit une réduction de l'ordre de 50.05%.
- Pour le 28<sup>ème</sup> jour, de 0.960 MPa, pour le mortier de référence, à 0.491 MPa (correspondant à 60% en copolymère ABS), soit une réduction de l'ordre de 48.85%.

La variation de la résistance à la compression du composite à 7, 14 et 28 jours, pour différentes formulations, est illustrée sur la figure rapportant la contrainte de rupture en compression en fonction de la teneur volumique en copolymère ABS (voir figure 4.16).



**Fig. 4.16.** Résistance à la compression des composites.

La résistance diminue notablement avec l'augmentation de la teneur en particules de polymère ABS. Pour une composition allant de 0 à 60%, la résistance à la compression varie :

- Pour le 7<sup>ème</sup> jour, de 32.87 MPa, pour le mortier de référence, à 18.87 MPa (correspondant à 60% en copolymère ABS), soit une réduction de l'ordre de 42.59%.
- Pour le 14<sup>ème</sup> jour, de 34.25 MPa, pour le mortier de référence, à 20.56 MPa (correspondant à 60% en copolymère ABS), soit une réduction de l'ordre de 39.97%.
- Pour le 28<sup>ème</sup> jour, de 43.31 MPa, pour le mortier de référence, à 28.75 MPa (correspondant à 60% en copolymère ABS), soit une réduction de l'ordre de 33.62%.

La résistance à la compression du composite, pour différentes teneurs en particules de polymère ABS à 28 jours, en fonction de la masse volumique, est représentée sur la figure 4.17.

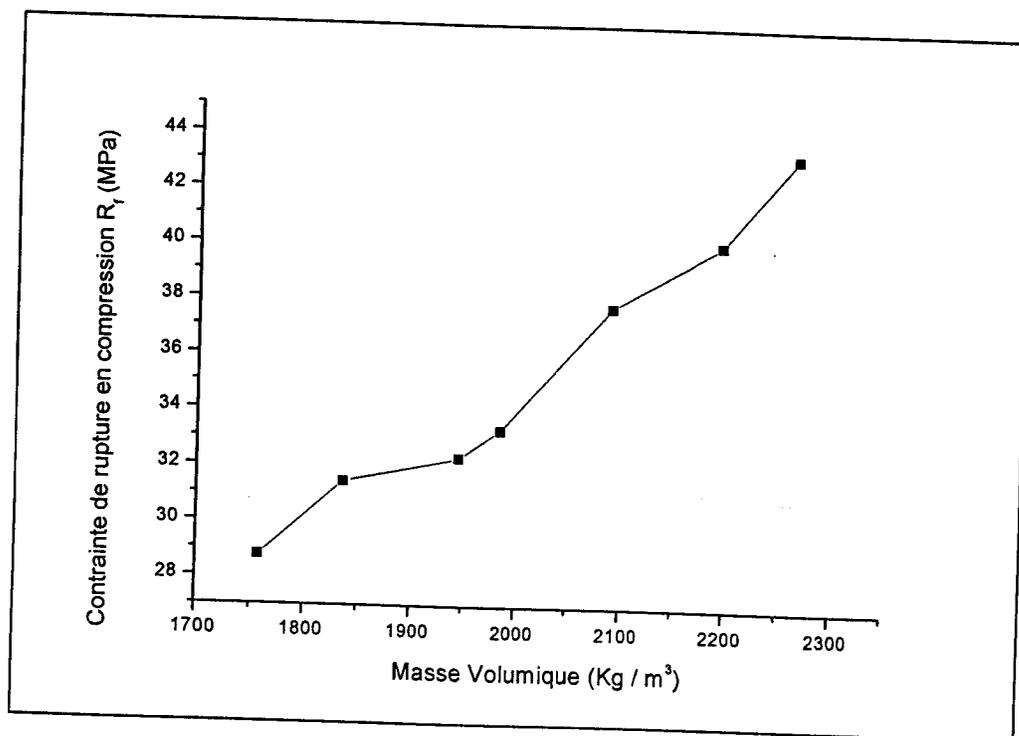


Fig. 4.17. Résistance à la compression en fonction de la masse volumique.

#### Commentaires :

La variation de la résistance à la traction par flexion et la compression du composite, à 7, 14 et 28 jours, à différentes formulations, sont données par les figures (voir figure 4.15 et figure 4.16). Pour une composition allant de 0 à

60%, la résistance diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en particules de polymère ABS. La perte de résistance est liée, d'une part, à la nature des particules de polymère ABS et d'autre part, à l'augmentation de la porosité en raison d'une plus grande quantité d'eau libre dans le matériau en fonction de la composition en polymère ABS. L'évaporation de cette eau, au cours du durcissement, engendre une porosité supplémentaire dans la matrice.

Le phénomène est accentué en raison de l'entraînement d'air. D'après la figure 4.17, la résistance à la compression  $R_c$  (MPa) varie en fonction de la masse volumique du matériau  $\rho$  ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ). Cette évolution est similaire à celles obtenues dans le cas des bétons légers. Les résultats montrent que malgré une baisse significative de la résistance à la compression, la valeur obtenue pour une composition à 60% en polymère ABS, reste compatible avec l'utilisation du matériau dans le domaine d'application des bétons légers de construction de "classe II" (masse volumique inférieure à  $1750 \text{ kg/m}^3$  et une résistance à la compression supérieure à 28 MPa), suivant la classification fonctionnelle de la RILEM (RILEM LC2, 1978).

La figure 4.15 montre que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation de la teneur en polymère ABS. La baisse de la résistance à la compression est plus importante que celle de la résistance à la flexion. Par ailleurs, une diminution de la quantité d'eau de gâchage permettrait de pallier en partie cette baisse de résistances et d'améliorer, en conséquences, les propriétés mécaniques du matériau puisque le dosage en eau est étroitement lié à la porosité.

#### IV.4- Conclusion

Les résultats obtenus dans ce travail concernant ce type de polymère qu'est l'ABS, montrent que malgré une baisse significative de la résistance à la compression, les valeurs restent compatibles avec l'utilisation du composite dans le domaine des bétons légers de construction de "classe II". Par ailleurs, la baisse de la résistance à la flexion est moins importante que celle de la compression.

*Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

Les polymères sont de plus en plus utilisés dans la conception de nouveaux matériaux composites car ils ont l'avantage d'être léger et plus résistant aux phénomènes de corrosion. Utilisés à l'échelle macroscopique comme grain de substitution de sable, il s'avère efficaces de part leur légèreté surtout.

Le matériau étudié est un mortier dans lequel le sable a été substitué par ces particules de copolymère ABS à des teneurs volumiques de 0, 10, 20, 30, 40, 50 et 60%. Nous avons évalué l'effet des particules de copolymère ABS sur les propriétés physico-mécaniques du composite.

Les résultats ont montré que malgré une baisse significative des résistances mécaniques, correspondant à un allègement allant jusqu'à 22.41%, le composite est compatible avec l'utilisation en matériau léger de construction de "classe II".

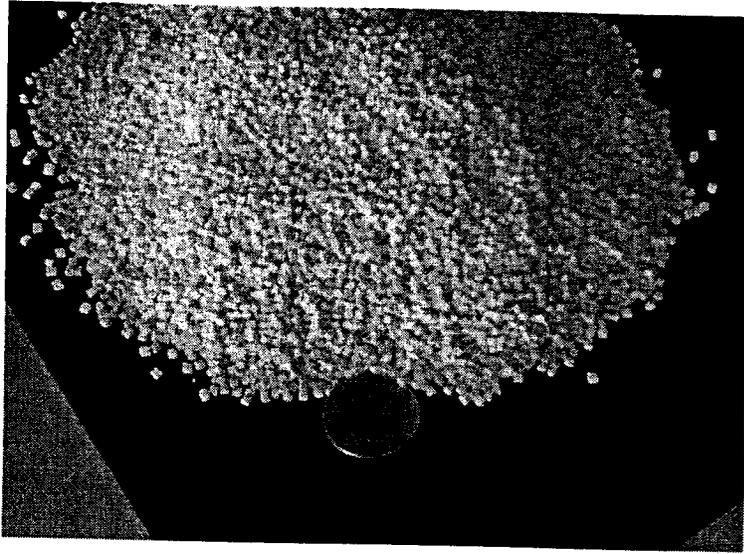
Le défi est de préparer une nouvelle génération de génie civil et d'ingénieurs pour utiliser à plein les potentialités des matières composites de ce type. Cela exige l'éducation systématique et la formation dans le domaine de conception et de fabrication des composites renforcée par des particules de polymère pour l'industrie de construction.

# *Annexe I*

## **Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS)**

L'ABS est un thermoplastique, dur, résistant à la chaleur et aux chocs, l'acrylonitrile fournissant cette résistance à la chaleur, et les éléments de styrène assurant sa rigidité. Il entre largement dans la fabrication d'appareils et téléphones domestiques, bagages, casques de sport, accessoires de canalisation et pièces pour véhicules automobiles.

L'ABS est un copolymère triséquencé constitué de monomères d'acrylonitrile, de butadiène et de styrène.



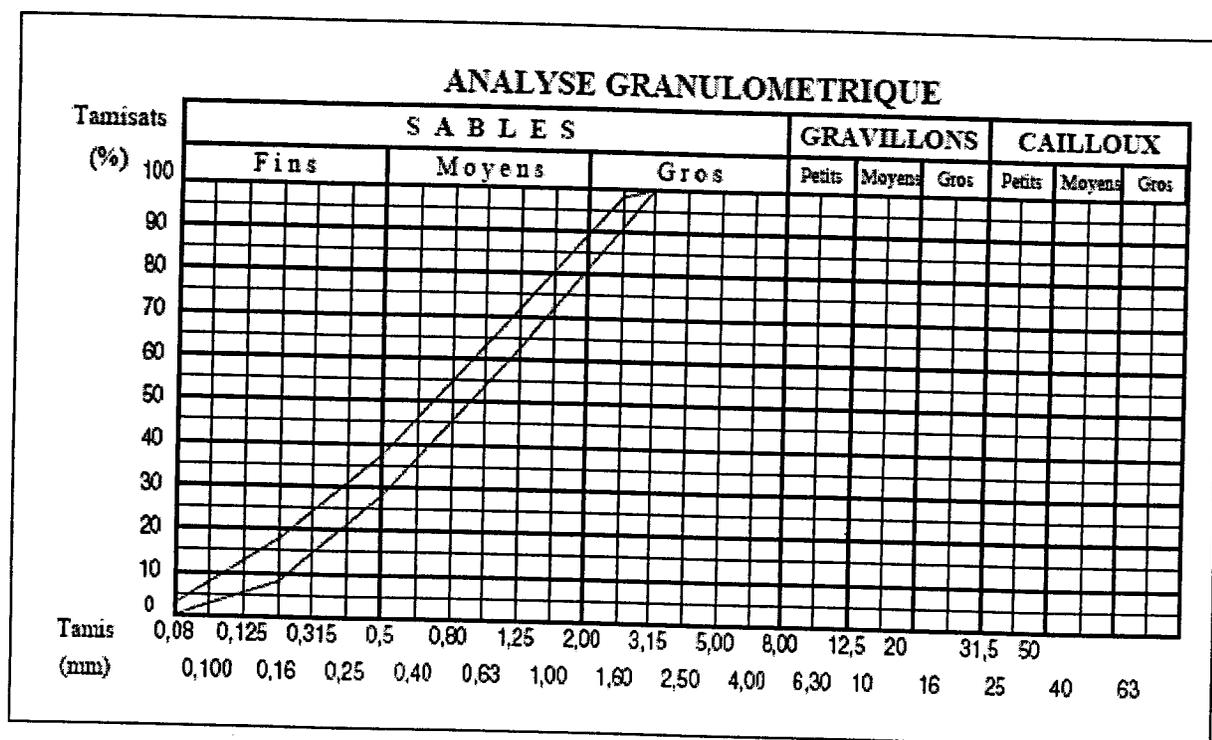
**Fig. A.1.** Acrylonitrile-Butadiène-Styrène (ABS).

## Annexe II

### DEFINITION DU MORTIER NORMAL (EN 196-1)

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme ( pour déterminer la consistance de la pâte de ciment).

Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé CECN EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est commercialisé en sac plastique de 1350 + 5g. Sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure suivante:



**Fig.A.2.** Composition granulométrique du sable de référence CEN

La composition du mortier à tester est le suivant :

- sable normalisé = 1350 g 65 g.
- ciment = 450 g 6 2 g.
- eau de gâchage = 225 g 6 1 g (le rapport de E/C est donc 0,50).

### **Bibliographiques**

1. T. GOTO, thèse de doctorat de l'Université Paris VI Pierre Et Marie, Influence des paramètres moléculaires latex sur l'hydrations, la rhéologie et les propriétés mécanique des composites ciment / Latex, 2006.
2. William D. Callister, Jr. © 2000, John & Sons, Inc. Science ET génie des matériaux, 2001. 620.1'1: p. 462 – 495.
3. A. Benazzouk all. Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment. Réunion Internationale des laboratoires et experts des matériaux, 2009.

### **Webographiques**

<http://www.arecpc.com/guide/index.html>

<http://www.la refer.org/matériaux/défaut.html>

<http://www.coursenligne.refer.org>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Résistance\\_des\\_matériaux](http://fr.wikipedia.org/wiki/Résistance_des_matériaux)