

**PDFZilla – Unregistered**

**PDFZilla - Unregistered**

**PDFZilla - Unregistered**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy – Bordj Bou Arreridj  
Sciences et de la Technologie  
Département Génie Civil

جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم هندسة مدنية



# Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLOME DE : Master

**Filière : Génie Civil**  
**Option : Matériaux**

Présenté par

**BELKHIRI Saber**

**BOUCHELAL Imad**

THÈME :

**Effet de rapport E/C et de l'eau magnétisée sur  
le transfert d'humidité dans le mortier de  
ciment.**

Soutenu le :03/07/2018

Devant le jury composé de :

- |                    |           |
|--------------------|-----------|
| - DJELOUL Chafia   | Président |
| - GUELMINE Layachi | Encadreur |
| - DEBOUCHA Sadek   | Examineur |
| - ZIANI Houcine    | Examineur |

Année Universitaire : 2017/2018

## Remerciement

*Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant qui nous a donne la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promoteur :*

*GUELMINE Lyachi... pour la sollicitude avec laquelle il a suivi et guide ce travail.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Toute notre gratitude va a tous les enseignants qui ont contribue a notre formation.*

*Nous remercions aussi tous nos amis pour leur aide, leur patience.*

## *Dédicaces*

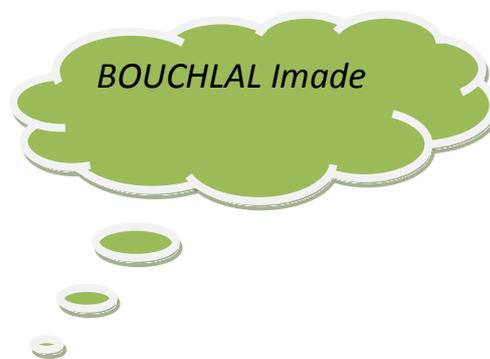
*Je dédie ce travail :*

- ✓ *A mes très chers parents ;*
- ✓ *A mes frères et sœurs ;*
- ✓ *A mes oncles ;*
- ✓ *A toute ma famille ;*
- ✓ *A mon encadreur ;*
- ✓ *A tous mes enseignants ;*
- ✓ *A tous mes amis fidèles ;*



*Je dédie ce travail :*

- ✓ *A mes très chers parents ;*
- ✓ *A mes frères et sœurs ;*
- ✓ *A mes oncles ;*
- ✓ *A toute ma famille ;*
- ✓ *A mon encadreur ;*
- ✓ *A tous mes enseignants ;*
- ✓ *A tous mes amis fidèles ;*



# **SOMMAIRE**

<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre-I- analyse bibliographique</b>	
I. 1.Introduction :.....	3
I.2. Mortier de ciment:.....	3
I.2.1. Constituants de mortier:.....	3
I.2.1.1 Sable :.....	3
I.2.1.2 Ciment:.....	4
I.2.1.3. L'eau de gâchage :.....	5
I.2.2. Propriétés de mortier:.....	5
I.2.2.1. Ouvrabilité:.....	5
I.2.2.2. Résistance mécanique :.....	5
I.2.3. Structure de la pâte de ciment:.....	6
I.2.3.1 Réaction d'hydratation :.....	6
I.2.3.2 Evolution de la structure poreuse au cours du temps (durcissement):.....	7
I. 2. 3.3. L'eau dans la microstructure de pâte du ciment :.....	8
I.2.3.4. Différents types de pore dans la pâte du ciment durci: .....	9
I.2.4. Les paramètres influençant les propriétés physicomécaniques de mortier:.....	9
I.2.4.1. Le rapport E/C :.....	9
I.2.4.2. Le mode de cure:.....	11
I.3. Transfert d'humidité dans les Matériaux cimentaires :.....	12
I.3.1. Conséquences de l'humidité sur la performance mécanique et thermique d'un matériau de construction :.....	12
I.3.2 Les différents mécanismes de pénétration de l'humidité à l'intérieur d'un matériau poreux :.....	13
I.3.2.1 La gravité :.....	13
I.3.2.2 L'énergie cinétique des gouttes d'eau :.....	14
I.3.2.3 La pression du vent :.....	14
I.3.3 Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'humidité dans un Matériau de construction :.....	15
I.3.3.1 Adsorption physique:.....	15
I.3.3.2 La capillarité :.....	16

I.3.4. Description physiques d'un matériau poreux :	16
I.3.4.1. La phase solide :	17
I.3.4.2. La phase liquide :	17
I.3.4.3. La phase gazeuse :	17
I.3.5. Modélisation du transfert d'humidité dans un matériau poreux:	17
I.4. Propriétés de l'eau exposée au champ magnétique	22
<b>Chapitre II : Techniques expérimentales.</b>	
II-1. Introduction :	23
II-2. Caractérisation des matières premières :	23
II.2.1. Essai sur le sable :	23
II.2.1.1. Analyse granulométrique : NFP.18-560[21]:	23
II.2.1.2 Equivalent de sable : NFB.18-598[21] :	24
II.2.1.3 Masse volumique apparente et absolue :	25
II.2.1.4 Compacité : NFP.18-555[21] :	26
II.2.1.5 Porosité : NFP.18-555[21]	26
II.2.2. Essai sur le ciment :	27
II.2.2.1 Surface spécifique :	27
II.2.2.2 Masse volumique absolue : NFP 18-558[21] :	27
II.2.2.3. Masse volumique apparente :	28
II.2.2.4. L'eau de gâchage :	29
II.3 Propriétés rhéologiques du ciment :	30
II.3.1 Consistance normale : NFP.15-573[21] :	30
II.3.2 Prise : NFP 15-573[21] :	30
II.4. Etude du mortier frais :	31
II.4.1 Préparation des mortiers étudiés :	31
II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :	34
II.5.1.Ouvrabilité :	34
II.5.1.1.Mode opératoire :	34

II.6. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci :.....	35
II.6.1.Propriétés physiques :.....	35
II.6.1.1. Porosité ouverte :.....	35
II.6.1.2 Masse volumique apparente :.....	36
II.6.2.Propriétés de transfert d'humidité :.....	36
II.6.2.1.La sorptivité:.....	36
II.6.2.2 Coefficient de transport capillaire : .....	37
II.6.3.Propriétés Mécaniques :.....	39
II.6.3.1.Résistance à la flexion : norme EN196-[21] :.....	39
II.6.3.2. Résistance à la compression : norme EN196-[21] :.....	40
II. 7. Conclusion :.....	41

### **Chapitre III : Matériaux et résultats expérimentaux.**

III.1. Introduction :.....	42
III.2.caractéristique des matières premières :.....	42
III.2.1 sable :.....	42
III.2.1.1 Analyse granulométrique :.....	42
III.2.1.2 Propriétés physico-chimiques du sable :.....	43
III.2.2. Ciment :.....	44
III.2.2.1 propriétés physique et composition chimique du ciment :.....	44
III.3.Caractérisation des mortiers étudiés :.....	44
III.3.1. Propriétés fraîches :.....	44
III.3.1.1. Consistance :.....	44
III.4 Propriétés physicomécaniques des mortiers à l'état durcis :.....	45
III.4.1 Porosité accessible:.....	45
III.4.2.Résistance à la flexion : .....	49
III.4.3.Résistance à la compression : .....	51
III.5. Propriétés de transfert d'humidité en phase liquide:.....	54

III.5.1.Détermination de la sorptivité:.....	54
III.5.2.Détermination du coefficient de transport capillaire $D_{\theta 1}$ :.....	59

## Liste des figures et photos

### Chapitre-I- analyse bibliographique :

**Figure (I.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.

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

**Figure (I.3) :** représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais et à l'état durci avec un rapport E/C variable.

**Figure (I.4) :** influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de la pâte de ciment portland âgées de 28 jours.

**Figure (I.5) :** influence d'humidité sur la conductivité thermique de certains matériaux de construction.

**Figure (I.6) :** la goutte d'eau pénètre dans le matériau ( $e > 0.50\text{mm}$ ).

**Figure (I.7) :** la goutte d'eau ne pénètre pas dans le matériau ( $e < 0.50\text{mm}$ ).

**Figure (I.8) :** si la pluie rencontre des fissures de largeurs suffisantes ( $> 4$  à  $5\text{mm}$ ), elle pénètre dans la paroi.

**Figure (I.9) :** si la pluie rencontre des fissures de largeurs suffisantes ( $< 4$  à  $5\text{mm}$ ), elle ruisselle à la surface du parement.

**Figure (I.10) :** en l'absence de vent, l'eau de pluie ruisselle à la surface de paroi.

**Figure (I.11) :** sous l'effet du vent, l'eau de pluie pénètre par les fissures du parement.

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

**Figure (I.13) :** Présentation physique d'un milieu poreux.

**Figure (I.14) :** Schéma de l'essai d'imbibition capillaire unidirectionnel.

**Figure (I.15) :** Evolution de la diffusivité hydrique d'un matériau en fonction de la teneur en eau volumique.

**Figure (I.16) :** Evolution de la diffusivité hydrique de mortier de ciment en fonction de la teneur en eau volumique avec différentes températures d'après Merouani.

**Photos (I.1) :** Détérioration de l'enveloppe intérieure d'un bâtiment par l'effet d'humidité ambiante.

**Photos (I.2) :** Détérioration de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment par l'effet d'humidité ambiante.

## **Chapitre II : Techniques expérimentales.**

**Figure(II.1) :** Procédé de magnétisation de l'eau de robinet.

**Figure (II.2) :** table d'étalement.

**Figure(II.3) :** Dispositif de mesure de la sorptivité par capillarité.

**Figure (II.4) :** Exemple de profil type.

**Figure (II.5) :** Essai d'imbibition capillaire utilisé pour la détermination des profils Hydriques  $\theta(z,t)$ .

**Figure(II.6) :** Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion.

**Figure(II.7) :** Dispositif de l'essai de rupture en compression.

**Photos (II.1) :** Analyse granulométrique.

**Photos (II.2) :** Essai d'équivalent de sable.

**Photos (II.3) :** Masse volumique apparente.

**Photos (II.4) :** Masse volumique absolue.

**Photos (II.5) :** malaxeur normalisé **EN 196-1**.

**Photos(II.6) :** Composition des mortiers préparés.

**Photos (II.7) :** Essai d'ouvrabilité.

**Photos(II.9) :** Dispositif expérimental de l'essai de flexion.

### **Chapitre III : Matériaux et résultats expérimentaux.**

**Figure (III.1)** : Résultats de l'analyse granulométrique du sable utilisé.

**Figure(III.2)** : Evolution de l'étalement en fonction de rapport E/C.

**Figure(III.3):** L'évolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction du rapport E/C(ENV3).

**Figure(III.4):** L'évolution de la porosité des mortiers étudiés du rapport E/C(ENV1).

**Figure(III.5):**L'évolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction du rapport E/C(ENV2).

**Figure(III.6):** évolution de la résistance à la flexion mortiers en fonction de rapport E/C (ENV3).

**Figure(III.7)** : évolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de rapport E/C(ENV2).

**Figure(III.8)** : évolution de la résistance à la flexion des mortiers En fonction en fonction de rapport E/C (ENV3).

**Figure(III.9)** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de rapport E/C(ENV2).

**Figure(III.10)** : Evolution de la résistance à la compression des Mortiers en fonction de rapport E/C (ENV1).

**Figure(III.11)** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de rapport E/C(ENV3).

**Figure(III.12)** : Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps et le rapport E/C (ENV2) .

**Figure(III.13)** : Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps et le rapport E/C (ENV1).

**Figure(III.14)** : Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps et le rapport E/C (ENV3).

**Figure(III.15) :** Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps (ENV2).

**Figure(III.16) :** Evolution du taux d'absorption des mortiers différents en fonction de la racine carrée du temps (ENV1).

**Figure(III.17) :** Evolution du taux d'absorption des mortiers différents en fonction de la racine carrée du temps (ENV3).

**Figure (III.18) :** Evolution de la sorptivité en fonction du rapport E/C pour les trois modes de Conservation.

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre-I- analyse bibliographique :**

**Tableau(I.1) :** Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.

### **Chapitre II : Techniques expérimentales.**

**Tableau (II.1) :** Opération de malaxage des mortiers.

**Tableau (II.2) :** Composition des mortiers préparés.

### **Chapitre III : Matériaux et résultats expérimentaux.**

**Tableau (III.I) :** Les propriétés physique du sable.

**Tableau(III.2) :** Propriétés physicomécaniques du ciment de M'sila.

**Tableau.III.3 :** Composition chimique moyenne du ciment utilisé.

**Tableau (III.4) :** composition massique (en grammes) des mortiers élaborés

**Tableau III.5 :** Porosité à l'état frais des composites élaborés.

**Tableau(III.6) :** Masse volumique apparentes et absolues, et porosités des différents mortiers élaborés pour les trois modes de conservation.

**Tableau(III.7):** les résultats moyens de la porosité ouverte aux différents âges des mortiers étudiés.

**Tableau (III.7) :** les résultats de la résistance à la flexion en fonction de rapport E/C des mortiers Elaborés conservation trois environnements de cure.

**Tableau (III.8) :** Les résultats de la résistance à la compression à différents rapport E/C et des Différents mortiers pour les trois environnements de cure.

**Tableau(III.9):** les résultats du taux d'absorption des différents mortiers étudiés(ENV2).

**Tableau (III.10) :** les résultats du taux d'absorption des différents mortiers étudiés (ENV1).

**Tableau(III.11) :** les résultats du taux d'absorption des différents mortiers étudiés (ENV3).

**Tableau(III.12) :** les résultats de la sorptivité des différents mortiers étudiés.

## Nomenclature

### Lettres latines :

A : section transversale [ $m^2$ ]

b : variable de Boltzmann [ $m \cdot s^{-0.5}$ ]

b : coté d'une section [m]

C : compacité [%]

$C_u$  : coefficient d'uniformité

d : dérivé totale

$D_{\theta i}$  : coefficient de transport capillaire

e : la porosité de la couche de ciment

e : l'épaisseur de couche de revêtement

Esp : équivalente du sable par piston [%]

Esv : équivalent du sabla par vue [%]

f : facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau

$f_c, f_f$  : charge de rupture en compression et en flexion [N]

i : taux d'absorption d'eau par unité de surface [ $m^3/m^2$ ]

K : la perméabilité du matériau [ $m^2/s$ ]

M : masse [kg]

$M_f$  : module de finesse

$P_c$  : pression de vapeur de l'ambiance [pa]

P : poids [kg]

Q : flux de l'eau liquide [ $m^3/m^2$ ]

$R_c$  : résistance à la compression [pa]

$R_f$  : résistance à la flexion [pa]

r : rayon du pore [ $\mu m$  ou nm]

$s_w$  : sorptivité [ $kgm^2 \cdot S^{-0.5}$ ]

T : température [ $c^\circ$  ou k]

T : temps [s]

V : volume [ $m^3$ ]

x.y.z : coordonnées spatiales.

**Lettres grecques :**

$\Phi$  : humidité relative [%]

$\Psi$  : section capillaire [m]

$\theta$  : la teneur en eau volumique [%]

$\epsilon_0$  : la porosité totale du matériau poreux [%]

$\rho_{app}$  : la masse volumique apparent [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_s$  : masse volumique absolue [kg/m<sup>3</sup>]

**Indice :**

a : air

c : capillaire

g : gaz

l : liquide

t : total

E : eau

C : ciment

S : sable

**Abréviations :**

CEM : ciment

CPJ42.5 : ciment portland composé de classe de résistance 42.5

H : hauteur

E/C : rapport massique ou volumique eau /ciment

Env1 : En mettant les éprouvettes dans l'ambiance du laboratoire

Env2 : En mettant les éprouvettes dans un bac d'eau potable de température

Env3 : En mettant les éprouvettes dans l'étuve

HR : humidité

MER : mortier préparé à l'eau du robinet

MEM : mortier préparé à l'eau magnétique

ملخص .

تعتبر الرطوبة من بين المشاكل التي لها خطر على ديمومة مواد البناء. السؤال الذي يبقى مطروح عن الكيفية التي يلج بها الماء وانتشاره في بعض مواد البناء وكيفية مغادرتها؟ وماهي العلاقات العكسية التي تربط بين الهيكل المسامي لهذه المواد وانتقال الرطوبة. هي عدة أسئلة يحاول العديد من الباحثين الوصول إليها وإيجاد نموذج رياضي للتعبير عنها.

الهدف الرئيسي لهذه المذكرة هو التقييم عن طريق التجارب المخبرية للخصائص الفيزيائية-الميكانيكية وانتقال الرطوبة بملاط إسمنتي صلب واستنباط العلاقة التي تربط بين المسامية ممثلة هنا بتعبير النسبة  $E/C$  و نوعية الماء المستعمل والخصائص المذكورة سابقا وبالخصوص تأثير النسبة  $E/C$  ونمط المعالجة على مختلف ميكانيزمات انتقال الرطوبة.

حيث بينة النتائج المتحصل عليها أن المسامية بدلالة النسبة  $E/C$  هي دالة لا خطية ذات قيم مختلفة والتي تكون فيها نسبة المسامية مرتفعة عند النسبة  $E/C=0.70$  وتتنخفض بانخفاض هذه الأخيرة.

كما انه تم تسجيل مقاومات ميكانيكية جد متقاربة رغم اختلاف نوعية الماء المستعمل (عادي-ممعظ) في كل وسط. حيث كما بينت النتائج المتحصل عليها أن المعالجة الرطبة لها تأثير ايجابي من حيث تقليل نسبة المسامية وبالتالي زيادة في المقاومة الميكانيكية للملاط , بخلاف الملاط المدروس في هواء المخبر والملاط الموضوع في الفرن .

وفي الأخير أن الشبكة المسامية المعقدة مع قلة الوسائل المخبرية الخاصة بهذا التشخيص لهذه الشبكة حالت دون تفسير العلاقة التي تربط بين خواص الانتقال والمسامية كون الظاهرة هي ابعده من ذلك .

## Résumé.

L'humidité fait partie des problèmes qui présentent un risque pour la durabilité des matériaux de construction. La question demeure de savoir comment l'eau est produite et comment elle est distribuée dans certains matériaux de construction et comment la laisser. Quelles sont les relations inverses entre la structure poreuse de ces substances et le mouvement de l'humidité? Y a-t-il plusieurs questions que de nombreux chercheurs essaient d'atteindre et trouvent un modèle mathématique à exprimer.

L'objectif principal de cette note est l'évaluation par des tests en laboratoire de la transmission physique des propriétés mécaniques de l'humidité Larry solide et le développement de la relation entre la porosité représentée ici signifie le rapport  $E / C$  et de la qualité de l'utilisateur de l'eau et les caractéristiques précédemment mentionnées, en particulier, l'effet du rapport  $E / C$  et le modèle de traitement sur un mécanisme différent de Transmission d'humidité.

Les résultats obtenus montrent que la porosité en  $E / C$  est une fonction non linéaire avec des valeurs différentes où le rapport de porosité est élevé à  $E / C = 0,70$  et décroît avec ce dernier.

Les résultats ont montré que le traitement par voie humide a un effet positif en termes de réduction du taux de porosité et donc d'augmentation de la résistance mécanique du mortier, par opposition à la suspension étudiée. Air souffleur et mortier dans le four.

Au final, le réseau de porosité complexe avec le manque de moyens de laboratoire pour ce diagnostic du réseau n'a pas réussi à expliquer la relation entre les propriétés de la transition et la porosité car le phénomène est au-delà.

Abstract .

Humidity is among the problems that have a risk for the durability of building materials. The question remains about how water is produced and how it is distributed in some building materials and how to leave it. What are the inverse relationships between the porous structure of these substances and the movement of moisture. Are several questions that many researchers are trying to reach and find a mathematical model to express.

The main objective of this note is to evaluate by laboratory experiments the physical-mechanical properties and moisture transfer of solid cement mortar and to develop the relationship between the porosity represented here by the ratio of E / C and the water quality used and the characteristics mentioned above and in particular the effect of the E / C ratio and the pattern of treatment on various mechanisms Moisture transmission.

The results obtained show that porosity in terms of E / C is a nonlinear function with different values where the porosity ratio is high at E / C = 0.70 and decreases with the latter.

The results showed that wet treatment has a positive effect in terms of reducing the porosity ratio and thus increasing the mechanical resistance of the mortar, as opposed to the slurry studied. Air blower and mortar placed in the oven.

In the end, the complex porosity network with the lack of laboratory means for this diagnosis of the network has failed to explain the relationship between the properties of the transition and porosity because the phenomenon is beyond.

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Introduction

Parmi les propriétés les plus courantes dans les matériaux de construction sont mécaniques (résistance à la compression et à la traction, module d'Young, coefficient de poisson, etc....) ou thermique (conductivité et diffusivité thermique etc....) ,on ne peut concevoir des construction sans connaitre l'influence de l'humidité sur sa durabilité , non seulement elle induit des phénomènes propres tels que les variations dimensionnelles (gonflement, retrait ) mais, elle influe également sur les autres caractéristiques telles que la diminution de la résistance mécanique et l'augmentation de la conductivité thermique. En outre, l'humidité influe également sur le confort dans la construction. En effet, les moisissures qu'elle engendre sont à l'origine de plusieurs cas pathologiques respiratoires et allergiques graves. 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.

Mais la question qui reste est de savoir comment l'eau peut pénétrer et répandre certains matériaux et comment les échapper ? Mais la relation existante entre la structure poreuse et le transfert de l'humidité dans ces matériaux, rester les questions les plus courantes que de nombreux chercheurs recherchent dans le domaine du transfert de masse et de chaleur afin d'obtenir des solutions, des réponses et des modèles.

Où ils sont souvent utilisés comme des gravats ou de la peinture murale. Et 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.

L'objectif principal est d'estimer les interconnexions entre la porosité et les différents mécanismes de transfert d'humidité dans les matériaux de génie civil poreux. Avec le ciment de mortier 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 perdues dans le laboratoire sous l'hypothèse de la température et les degrés de pression nuls. Afin d'atteindre cet objectif, ce travail a été subdivisé en trois chapitres.

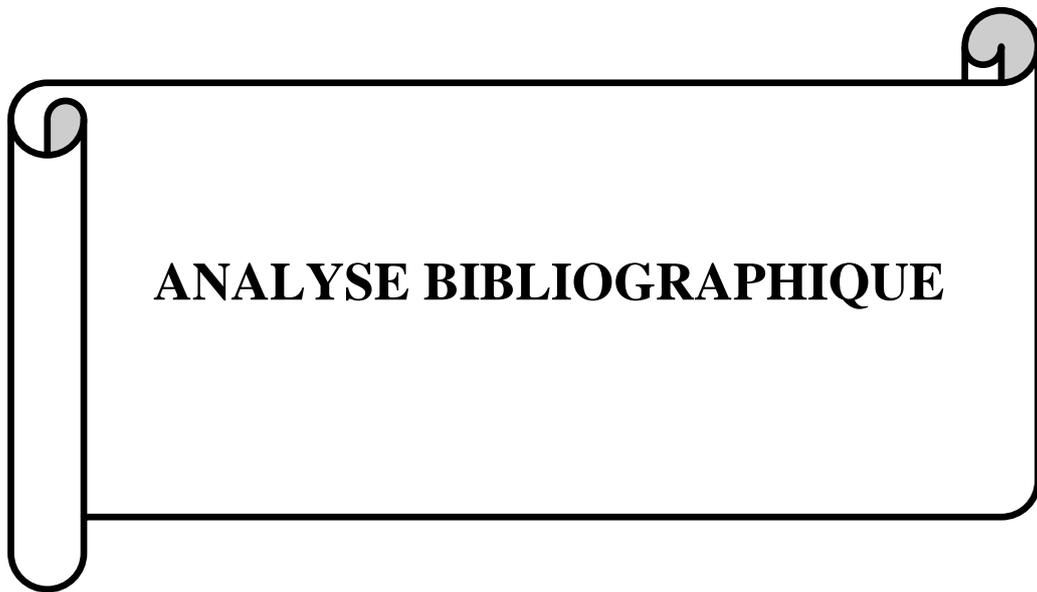
La première partie est consacrée à des rappels de notion qui seront utilisées au cours de ce travail (les différents types des mortiers, milieu poreux, transfert de masse, ... etc.) et les résultats trouvés par les différents chercheurs dans le domaine de transfert de masse.

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 BIBLIOGRAPHIQUE**

## CHAPITRE I – ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

### I. 1. Introduction :

Le présent chapitre est une analyse bibliographique des travaux de recherches antérieurs sur l'effet de rapport E/C et le mode de cure de mortier ou béton soumis à un gradient d'humidité. Il sera divisé en quatre grandes parties. La première partie portera sur la description des constituants du mortier, la deuxième partie est consacrée à l'influence des de rapport E/C, mode cure et le type d'eau de gâchage sur les propriétés fraîches et durcies des matériaux cimentaires, dans le troisième 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  $\mu\text{m}$  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 on trouve:

- **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.

### 1.2.1.2 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 froidi 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 (I.1):** désignation 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%	≤ 35%	•	•	•	10% ≤ total	36% ≤ total	18% ≤ total	31% ≤ total
Cendres siliceux (V)	•	(fumée de silice	(fumée de silice	•	•	•	≤ 35% (fumée	≤ 55% (fumée	≤ 30%	≤ 50%
Fumée de silice (D)	•	≤ 10%	≤ 10%	•	•	•	≤ 10%	≤ 10%	•	•
Cendres calciques (W)	•			•	•	•	•	•	•	•
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.2.2. Propriétés de mortier:**

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

#### **I.2.2.1. Ouvrabilité:**

Une pâte de mortier peut avoir, suivent 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.2.2.2. 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.

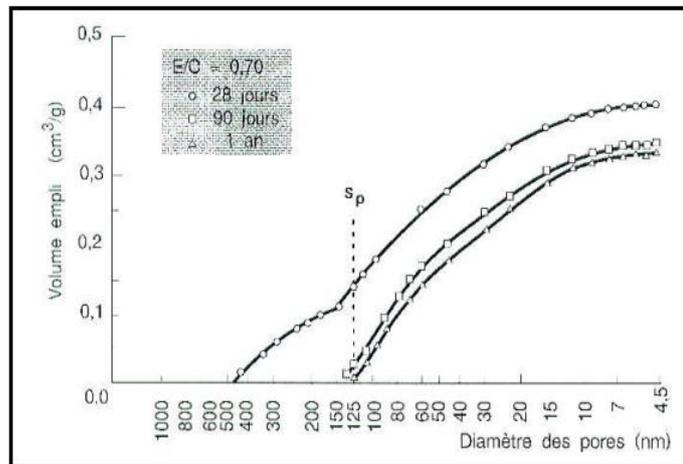
### **I.2.3. Structure de la pâte de ciment:**

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.

#### **I.2.3.1 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 $\mu$ m seulement et de 8 $\mu$ 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 $\mu$ 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].

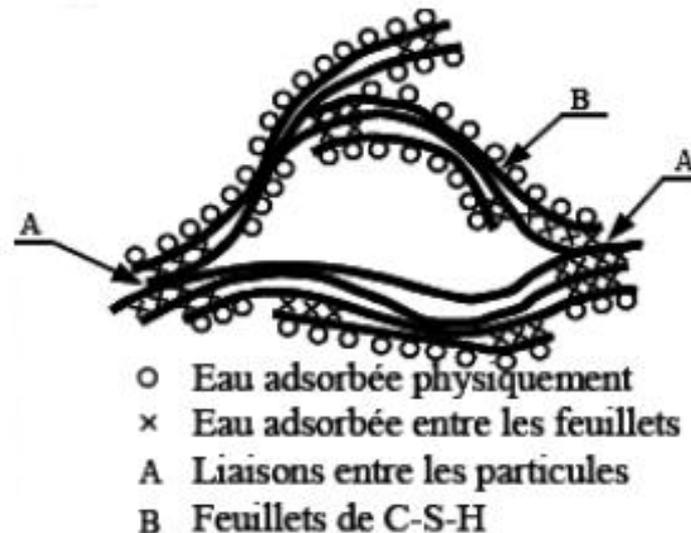


**Figure (I.1) :** Influence de la durée de l'hydratation sur l'évolution porosimétrique d'une pâte de ciment dont le rapport E/C est voisin de 0.70 [4].

### I.2.3.2 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  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 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.2.3.3. 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.

#### **I.2.3.4. 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:**

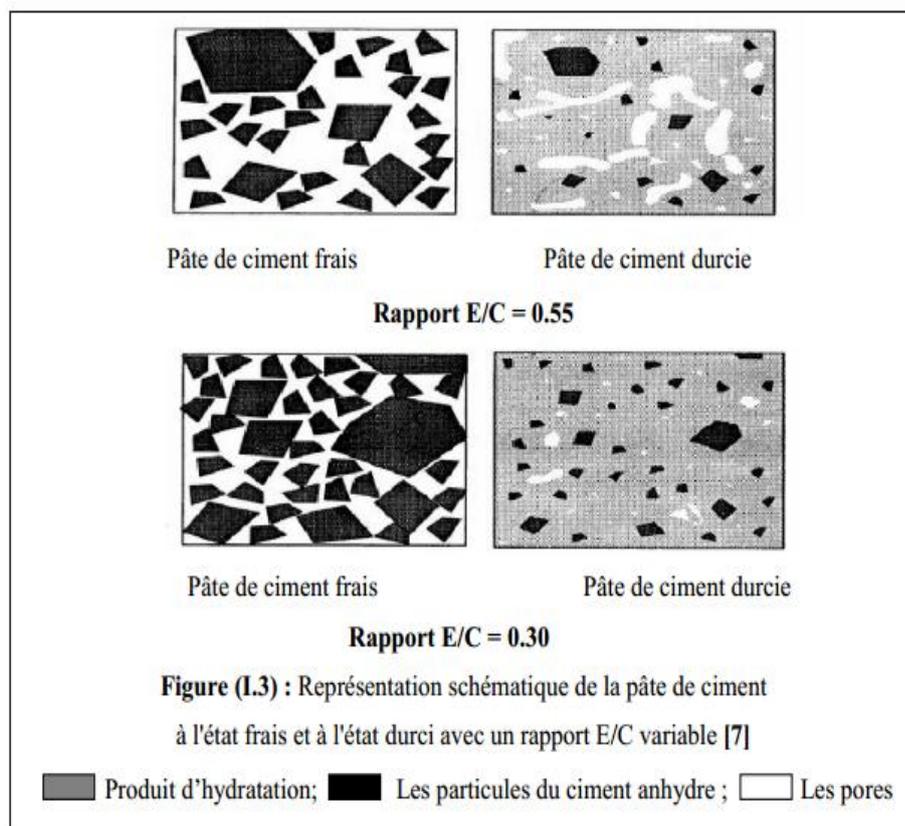
Les pores de gel sont essentiellement des vides interstitiels interconnectés entre les particules de gel en forme d'aiguilles, de plaques ou de feuillets. Leur diamètre nominal étant inférieur à 2 ou 3nm, ce qui correspond à un ordre de grandeur supérieur à la dimension des molécules d'eau. Pour cette 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].

#### **I.2.4. Les paramètres influençant les propriétés physicomécaniques de mortier:**

##### **I.2.4.1 Le rapport E/C :**

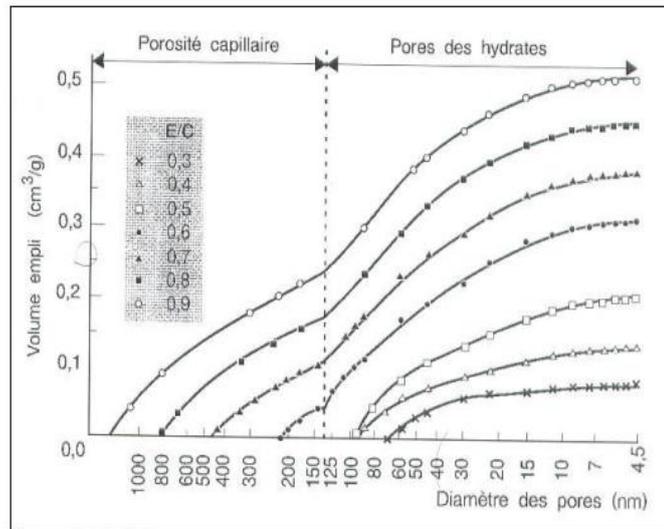
Le rapport Eau/Ciment exerce une grande influence sur la porosité de la pâte du ciment hydraté car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Supposons que l'on utilise une très grande quantité d'eau

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].



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 du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de la pâte de ciment Portland âgées de 28 jours [4]

#### I.2.4.2. 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]. 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.

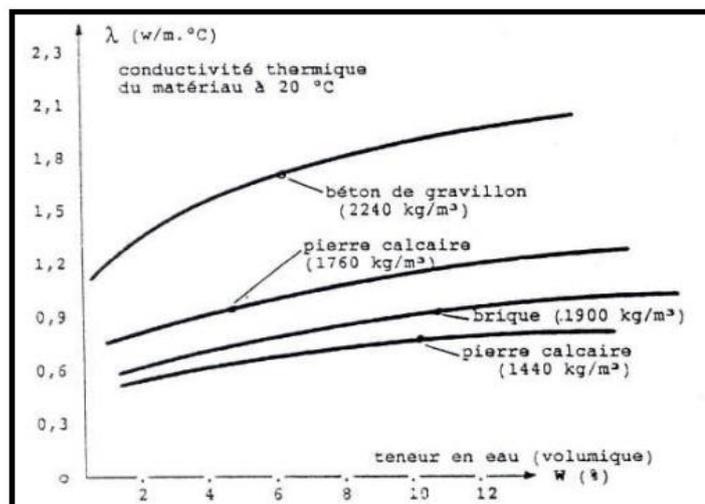
- **Cure chaude:**

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.3. Transfert d'humidité dans les Matériaux cimentaires :

#### I.3.1. 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 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 [12].

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).

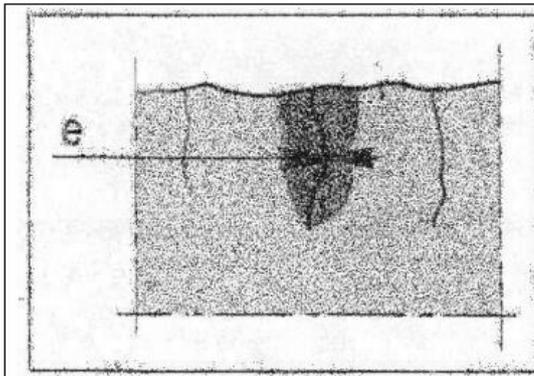
	
<p><b>Photos (I.1):</b> Détérioration de l'enveloppe intérieure d'un bâtiment par l'effet d'humidité ambiante</p>	<p><b>Photos (I.2):</b> Détérioration de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment par l'effet d'humidité ambiante</p>

### **I.3.2 Les différents mécanismes de pénétration de l'humidité à l'intérieur d'un matériau poreux :**

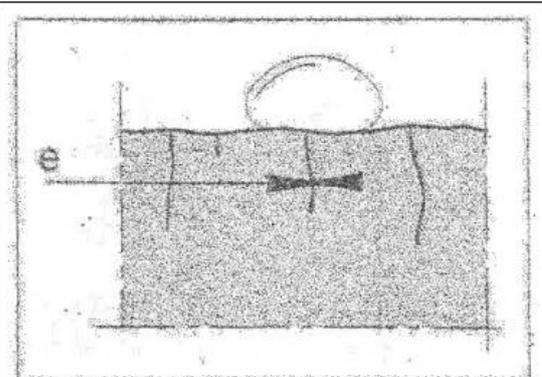
Il est y de nombreux phénomènes physiques et chimiques qui peuvent agir isolément ou simultanément permettant à l'humidité de pénétrer puis de se répandre dans les matériaux de construction [13], parmi ces mécanismes:

#### **I.3.2.1 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 réperdront pas à l'intérieur des matériaux (figure I.7) [13].



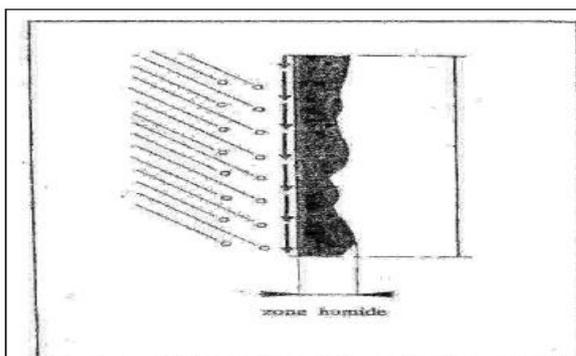
**Figure (I.6):** la goutte d'eau pénètre dans  
Le matériau ( $e > 0.50$  mm) [13]



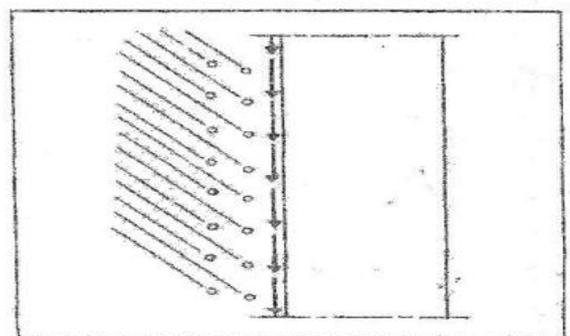
**Figure (I.7) :** la goutte d'eau ne pénètre pas  
dans le matériau ( $e < 0.50$  mm) [13]

### I.3.2.2 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.8):** Si la pluie rencontre des  
fissures de largeur suffisante ( $> 4$  à  $5$  mm),  
elle pénètre dans la paroi [13]

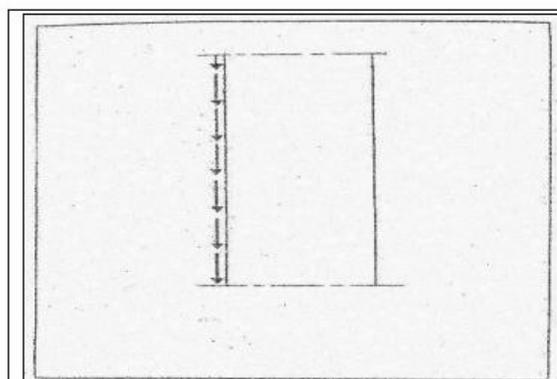


**Figure (I.9):** Si la pluie ne rencontre pas de  
Fissure de largeur suffisante ( $< 4$  à  $5$  mm), elle  
ruisselle à la surface du parement [13]

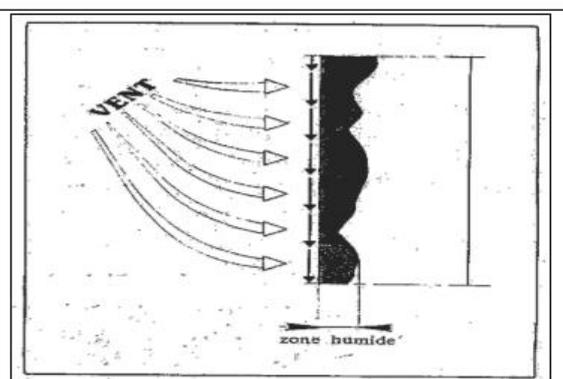
### I.3.2.3 La pression du vent :

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.10):** en l'absence de vent, l'eau de pluie ruisselle à la surface de la paroi [13]



**Figure (I.11):** sous l'effet du vent, l'eau de pluie pénètre par les fissures du parement [13]

### **I.3.3 Les mécanismes physiques fondamentaux de fixation de l'humidité dans un Matériau de construction :**

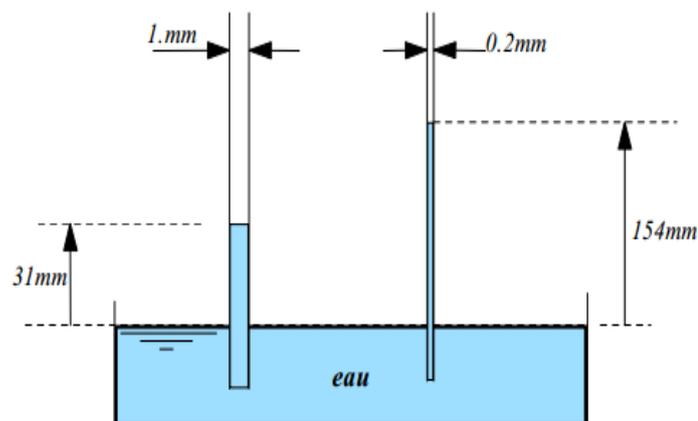
D'une manière générale, la fixation de l'humidité dans les milieux poreux résulte de l'action plus ou moins conjointe de deux mécanismes physiques fondamentaux:

#### **I.3.3.1 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.3.3.2 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  $0.5\text{ mm}$ ).



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

### I.3.4. Description physiques d'un matériau poreux :

Un matériau poreux à l'état naturel est un milieu hétérogène indéformable tri-phasique constitué d'une phase solide (indice  $s$ ), d'une phase liquide (indice  $l$ ) et d'une phase gazeuse (indice  $g$ ). Au niveau macroscopique la description complète d'un tel milieu suppose donc la description de chacune de ces phases et de leur proportion relative [14,18,19] comme il a montré la figure (I.13).

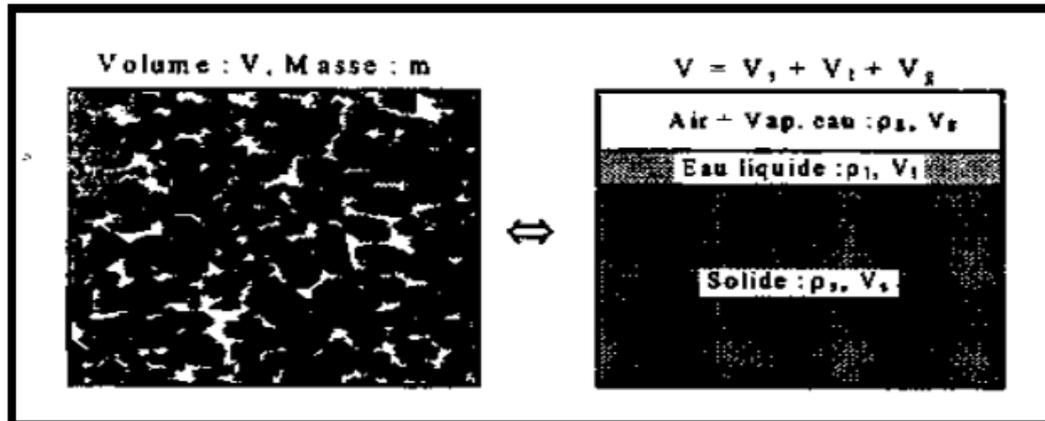


Figure (I.13) : Présentation physique d'un milieu poreux.

#### I.3.4.1 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.3.4.2 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  $\omega$  :**  
En considérant généralement que la teneur en eau vapeur est négligeable devant la teneur en eau liquide.
- **La teneur en eau volumique  $\theta$  :**  
C'est le volume occupé par l'eau condensé par l'unité de volume du milieu étudié.

#### I.3.4.3 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.3.5 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]:

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

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

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

$D_\theta$  et  $D_T$  représentent les diffusivités hydriques isotherme et non isotherme du matériau poreux.

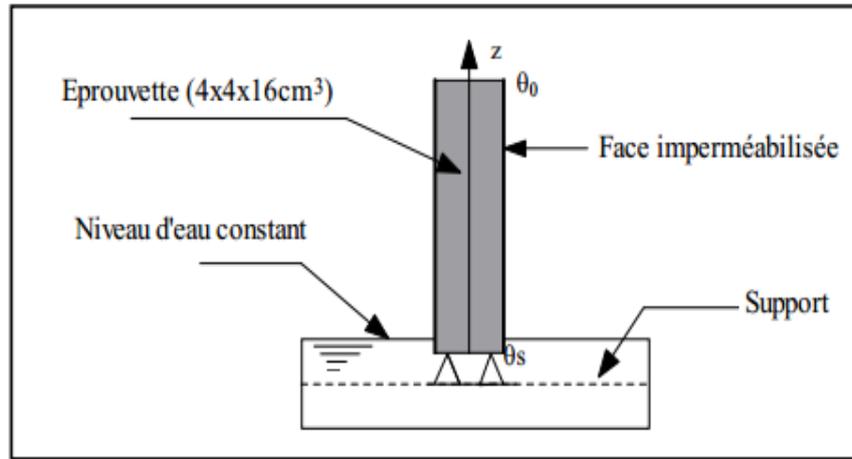
Le terme  $\frac{\partial K}{\partial z}$  représente l'effet de la pesanteur sur le transfert d'humidité

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 :

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

$D_\theta$  est le paramètre de transfert hydrique appelé diffusivité hydrique exprimé en (m<sup>2</sup>/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-14) :** Schéma de l'essai d'imbibition capillaire unidirectionnel

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 :

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

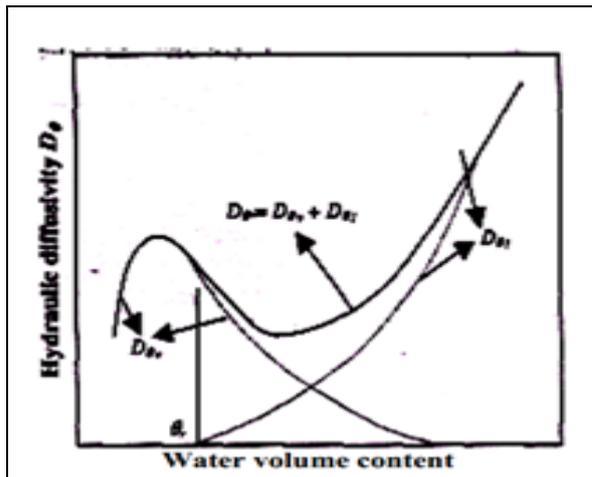
Avec :  $\theta = \theta$

$s$  pour  $b = 0$  et  $\theta = \theta_0$  lorsque  $b \rightarrow \infty$  Le coefficient de transport capillaire à une teneur en eau  $\theta$  est déterminé par intégration de l'équation (I.4) ce qui donne :

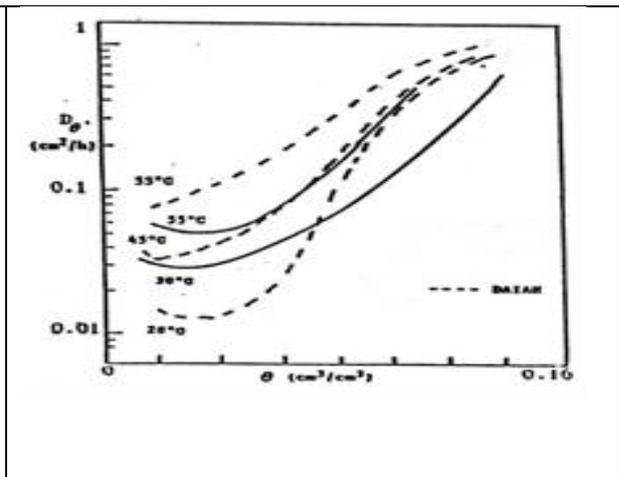
$$D_\theta = -\frac{1}{2} \frac{1}{\left( \frac{d\theta}{db} \right)_\theta} \int_{\theta_0}^\theta b \cdot d\theta \dots\dots\dots(I.5)$$

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 profil 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.15) :** Evolution de la diffusivité hydrique d'un matériau en fonction de la teneur en eau volumique [18,19].



**Figure (I.16) :** 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  $\nabla P_c$ , et la diffusivité hydrique se confond avec le coefficient de transport capillaire.

#### **I.4. Propriétés de l'eau exposée au champ magnétique :**

Le biophysicien Philippe Vallée a consacré de nombreuses études scientifiques à l'action des champs électromagnétiques sur les propriétés physico-chimiques de l'eau et leurs interconnexions sur les systèmes biologiques. Bien évidemment lorsque Philippe Vallée démontre avec cohérence que les champs électromagnétiques ont bien un effet sur l'eau et que *"presque rien peut modifier les propriétés d'un verre d'eau"*. Néanmoins depuis plusieurs années contre vents et marées il a réussi à consacrer avec rigueur toutes ses recherches sur cette unique question controversée de l'influence des effets des champs électromagnétiques de l'eau sur la santé des êtres vivants.

Dans le courant de l'année 2002, Philippe Vallée commence à récolter les fruits de son investissement ; ses expériences montrent que les intensités de diffusion élastique de la lumière ne sont pas les mêmes selon que ces derniers ont été ou pas exposés au traitement électromagnétique. Autrement dit, la lumière rencontre moins d'obstacles lorsqu'elle traverse de l'eau électro magnétisée les organismes biologiques étant composés de solutions aqueuses et d'une multitude d'interfaces, mes résultats invitent sérieusement à se poser des questions de l'interaction des champs électromagnétiques, mêmes faibles, avec le vivant (exemple de valeurs : champ magnétique d'environ 1 mT et champs électrique d'environ 4 mV/ m) [21].

# **CHAPITRE II.**



**Techniques expérimentales**

## Chapitre II : Techniques expérimentales

### II-1) Introduction :

Dans ce chapitre nous avons défini l'importance des essais appliqués sur le sable, le ciment, et le mortier dans toutes les étapes, pour connaître l'effet de l'eau exposée au champ magnétique, le rapport E/C et le mode de cure sur les propriétés physico-mécaniques notamment les propriétés de transfert d'humidité des mortiers étudiés.

### II-2. Caractérisation des matières premières :

#### 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 les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. 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 :



**Photo (II.1) :** Analyse granulométrique

**A. 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 :

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

**B. Coefficient d'uniformité :**

C'est le rapport entre le diamètre des granulats correspondant à un pourcentage des 60% des passants sur le diamètre correspondant à un pourcentage de 10%. Il est donné par la relation suivante.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{II. 2})$$

$D_{10}$  est diamètre de tamis proportionnel au 10% de tamis total.

$D_{60}$  est le diamètre de tamis proportionnel au 60% de tamis total.

**C. Coefficient de courbure :**

Le coefficient de courbure caractérise la régularité de la granulométrique du sable utilisé, et donnée par la relation suivant :

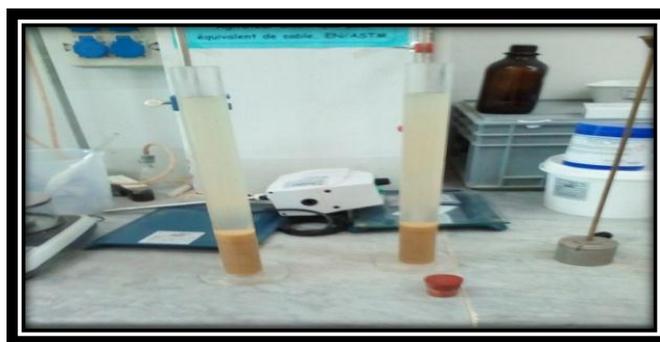
$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \cdot D_{10}) \quad (\text{II. 3})$$

$D_{30}$  est le diamètre de tamise proportionnel au 30% de tamise total.

**II.2.1.2 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 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 flocculat. Ce coefficient est déterminé conformément à la norme **NFP.18-598**. ON détermine la qualité des sables par les coefficients suivants :



**Photos (II.2) : Essai d'équivalent de sable.**

L'équivalent du sable visuel :  $E_{sv} = h'2/h1$  **(II.4)**

L'équivalent du sable par piston :  $E_{sp} = h2/h1$  **(II.5)**

Avec :

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

### **II.2.1.3 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  $Vt$ . Il s'agit de remplir un volume de  $1 \text{ dm}^3$  et déterminer sa masse  $M$  par peser, soit :



**Photos (II.3) : Masse volumique apparente**

- **La masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue  $\rho_s$  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 500cm<sup>3</sup>. Le volume du liquide déplacé détermine le volume absolu  $V_s$  des grains solides.

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

#### **II.2.1.4 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 :

$$C = V_s/V_t \quad (\text{II.8})$$

#### **II.2.1.5 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 ;

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

## II.2.2. Essai sur le ciment :

### II.2.2.1 Surface spécifique :

La surface spécifique de Blaine est la surface totale en cm<sup>2</sup> 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 :

$$SSB = k \frac{\sqrt{e} \sqrt{t}}{\rho_s (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (\text{cm}^2/\text{g}) \quad \text{(II.10)}$$

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) ;  $\rho_s$  : la masse spécifique du ciment (g/cm<sup>3</sup>) et  $\eta$  : la viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai.

### II.2.2.2 Masse volumique absolue : NFP 18-558[21]

On déterminer 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.

$$\rho_s = \frac{M}{V_s} \quad (\text{II.11})$$

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



**Photos (II.4) : Masse volumique absolue**

### II.2.2.3. Masse volumique apparente :

La densité apparente d'un matériau est le poids d'une unité de volume de matériau. Il s'exprime en kg/m<sup>3</sup>. 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.

➤ L'essai consiste à :

- 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 sur les bords 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 :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (\text{II.12})$$

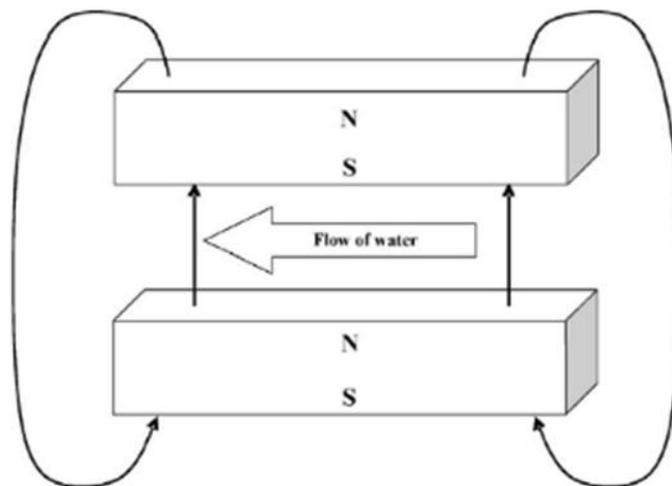
#### II.2.2.4 L'eau de gâchage :

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. L'eau de gâchage des mélanges de mortiers confectionnés est issue directement du robinet du réseau public d'eau potable. Ces propriétés chimiques n'ont pas fait l'objet de la présente étude. Donc, elle est supposée propre et ne contenir aucune impureté nuisible conformément à la norme NF.18-303.

#### Dans notre étude nous avons utilisé deux types d'eau de gâchage :

- L'eau de robinet : on considère comme une eau référence,
- L'eau exposée au champ magnétique statique est préparé selon le procédé décrit ci-dessous :

Cette nouvelle technologie très peu définie assure une magnétisation de l'eau le rendant vital. Afin de mieux comprendre cette nouvelle notion, l'objet de cette étude consiste à évaluer les effets de l'eau magnétisée sur les propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaires gâchés avec cette eau.



Figure(II.1) : Procédé de magnétisation de l'eau de robinet.

Les propriétés de l'eau magnétisée sont les suivantes :

- ❖ Elle augmente considérablement sa fréquence vibratoire.
- ❖ Elle favorise l'ionisation des molécules d'eau.
- ❖ Plus des ions hydroxyle (OH-) sont créés pour former des molécules alcalines, et réduire l'acidité.

### II.3 Propriétés rhéologiques du ciment :

#### II.3.1 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 détermine 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  $1000 \pm 1\text{g}$ .

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  $6 \pm 1\text{mm}$  comptée à partir du fond.

#### II.3.2 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.

- **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.
- **La fin de prise** : c'est l'instant où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte.

#### **II.4. Etude du mortier frais :**

##### **II.4.1 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\*16cm<sup>3</sup>, 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.



Photos (II.5) : malaxeur normalisé EN 196-1.

Tableau (II.1) : 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	
Durée			30 s	30 s	15 s	1mn 15s	Durée
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Arrêt		Vitesse rapide



**Photos(II.6) :** Composition des mortiers préparés

**Tableau (II.2) :** Composition des mortiers préparés

Type de mortier	Rapport E/C	sable(g)	ciment(g)	eau magnétique(g)
MEM	0.45	1350	450	202.5
MEM	0.50	1350	450	225
MEM	0.60	1350	450	270
MEM	0.70	1350	450	315

Si préparé est versé en fin du malaxage dans des moules 4\*4\*16cm<sup>3</sup>, 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 occlus 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. Dans le but d'étudier l'effet de différentes modes de cure sur le développement des propriétés physico-mécaniques des mortiers de, la conservation des éprouvettes s'effectuera dans trois environnements différents qui sont les suivant :

- **Environnement témoin ENV1 :** En mettant les éprouvettes dans l'ambiance du laboratoire à 20±2°C et HR=55±5%.

- **Environnement humide ENV2** : En mettant les éprouvettes dans un bac d'eau potable de température  $18 \pm 2^\circ\text{C}$ .
- **Environnement humide ENV3** : En mettant les éprouvettes dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$ .

L'examen des propriétés physico-mécaniques des composites étudiés est effectué à 28 jours à compter de la date du collage des éprouvettes.

## II.5. Essai physico-mécaniques sur le mortier frais :

### II.5.1. 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** :



**Photos (II.7) : Essai d'ouvrabilité**

#### II.5.1.1. Mode opératoire

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 : tapes 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.

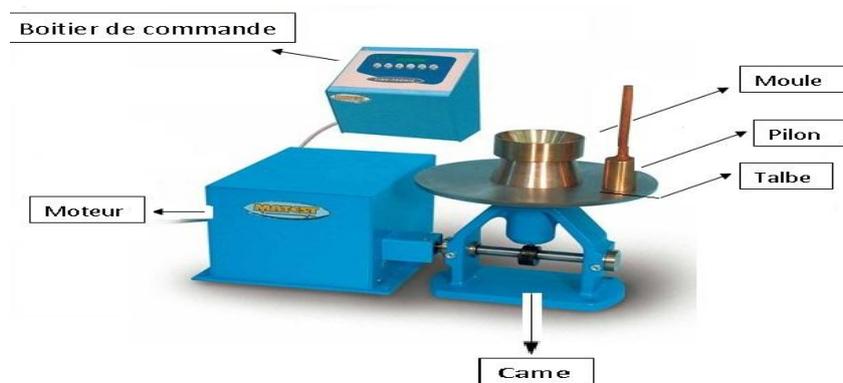


Figure (II.2) : table d'étalement.

## II.6. Essai physico-mécaniques sur le mortier durci.

### II.6.1. Propriétés physiques :

#### II.6.1.1. 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\*4\*16cm<sup>3</sup>. 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 :

$$P = \frac{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100 \quad (\text{II.13})$$

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

$m^{\text{sat}}$  : la masse saturée.

$m^{\text{sec}}$  : la masse sèche.

### II.6.1.2 Masse volumique apparente :

Par définition, la masse volumique apparente sèche  $\rho_{\text{app}}$  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 [9].

### II.7. Propriétés de transfert d'humidité :

Au-delà d'une teneur en humidité critique obtenue en sorption à HR =98%, la teneur en eau dans l'échantillon ne peut évoluer que lorsque celui-ci est mis en contact direct avec de l'eau liquide. Car à HR=98%, seulement les pores de diamètres inférieurs à 0.1 $\mu\text{m}$  sont condensables. L'autre gamme de pores de diamètres supérieurs à 0.1 $\mu\text{m}$  ne se sature qu'en contact avec de l'eau liquide. L'essai d'imbibition capillaire est donc utilisé pour étudier l'évolution de la teneur en humidité lorsque le matériau est mis en contact avec une nappe d'eau liquide [39,40,41]. Les essais d'imbibition capillaire, on été réalisés sur des éprouvettes de section (4x4cm<sup>2</sup>) et de longueur 16cm, préalablement séchées dans une étuve jusqu'à masse constante. Leurs faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un ruban adhésif afin d'assurer un écoulement unidirectionnel. Ceci présente l'éventuel inconvénient de faire obstacle à l'évacuation de l'air chassé par l'imbibition, mais permet de prémunir les faces latérales des éprouvettes contre les échanges d'humidité avec l'air environnant. L'alimentation en eau liquide est assurée en mettant des sections transversales de l'éprouvettes en contact avec l'eau contenue dans un bac de grandes dimensions, la profondeur d'immersion a été prise d'environ 5mm [36,42,43]. Le dispositif expérimental utilisé dans cet essai est schématisé sur la figure (II.7) et la photo (II.4) :

#### II.7.1. La sorptivité:

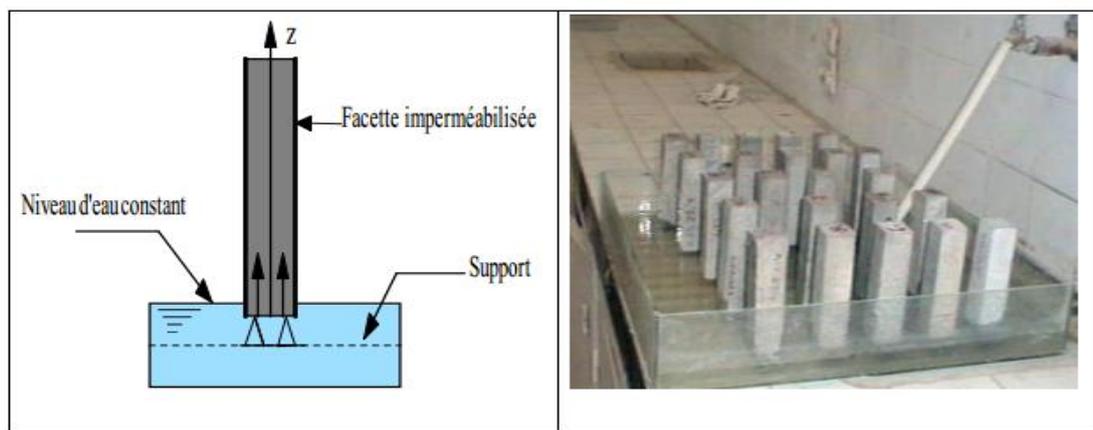
Expérimentalement, la sorptivité est déterminée directement par une méthode gravimétrique en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La courbe d'évolution obtenue

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/cm<sup>3</sup>) [9]. Le taux d'absorption volumique par unité de surface  $i$  (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>) à un instante.

$t$ , donnée a calculé par la formule suivante :

$$i = \frac{m(t)-m(0)}{A\rho_1} \quad (\text{II.14})$$

Où :  $\rho_1$  est la masse volumique de l'eau liquide = 1g/cm<sup>3</sup>.



**Figure(II.3) :** Dispositif de mesure de la sorptivité par capillarité.

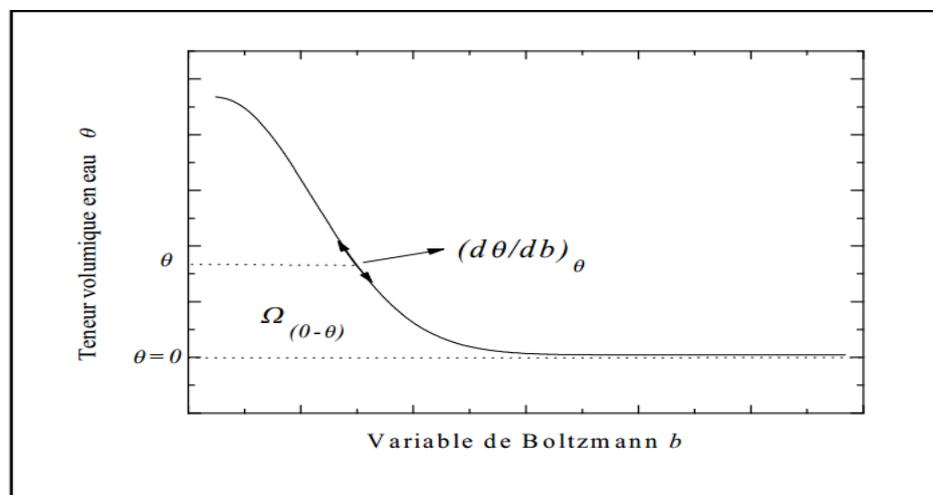
### II.7.2 Coefficient de transport capillaire :

Le paramètre déterminé par cet essai est la diffusivité hydrique  $D_{01}$  ou le coefficient de transport capillaire. C'est un paramètre fondamental dans les problèmes de simulation du mouvement de l'humidité dans les matériaux décrits par les modèles mathématiques de transfert d'humidité, il est variable avec la température et la teneur en eau. Dans cette étude on s'intéresse à l'influence de la teneur en eau sur le coefficient de transport capillaire dans les conditions ambiantes du laboratoire ( $t = 20 \pm C$ ). Le coefficient de transport capillaire à une teneur en eau  $\theta$  est déterminé en appliquant la formule donnée par l'équation (I.33).

Le coefficient de transport capillaire à une teneur en eau  $\theta$  est déterminé par intégration de l'équation (I.32) ce qui donne :

$$D_0 = -\frac{1}{2} \frac{1}{\frac{d\theta}{db}} \int b \cdot d\theta \quad (\text{I.5})$$

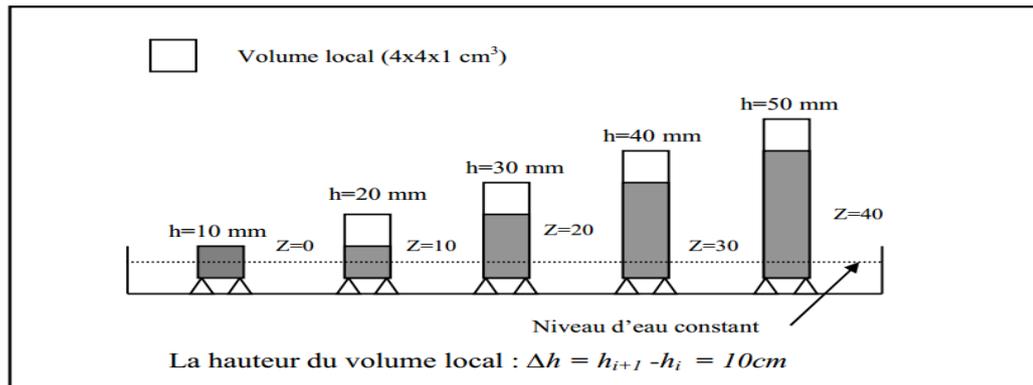
La pente  $\left(\frac{d\theta}{db}\right)$  et l'aire  $\left(\int b \cdot d\theta\right)$  peuvent être déterminées expérimentalement à partir de la courbe du profil type représentant la variation de la teneur en eau volumique  $\theta$  en fonction de la variable de Boltzmann comme illustré sur la figure (II.4).



**Figure (II.4) :** Exemple de profil type  $\theta(b)$ [36].

Les méthodes généralement employées pour déterminer les profils hydriques  $q(z,t)$  sont : l'atténuation des rayons  $\gamma$  et la résonance magnétique nucléaire RMN B. Perrin [34]. Ces deux techniques ont l'avantage de poursuivre automatiquement l'évolution de la teneur en humidité dans un milieu poreux sur une période de temps assez longue (quelques jours). Malheureusement, elle nécessite des équipements qui ne sont pas disponibles dans notre laboratoire. Dans des travaux de recherches récents, M.S. Goual et al [36], ont développé une nouvelle technique pour tracer les profils hydriques  $\theta(z,t)$  et l'estimation du coefficient de transport capillaire  $D\theta_i$ . Cette méthode nécessite seulement, une balance de précision de 0.1g, une étuve et un chronomètre. Le principe de la méthode consiste à la détermination de l'évolution en fonction du temps du volume d'eau absorbé par différentes hauteurs de l'échantillon. Celles-ci sont découpées d'une même éprouvette ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ) à l'aide d'une scie rotative. Les hauteurs des différents éléments découpés doivent être déterminées

préalablement de sorte que la différence entre deux hauteurs successives soit égale à la hauteur du volume local  $\Delta h$  fixé auparavant et qui fait l'objectif du suivi de l'évolution de la teneur en eau dans le temps. Les hauteurs successives découpées sont: 10mm, 20mm, 30mm, 40mm et 50mm. La différence entre les hauteurs successives est de 10mm, elle représente pour nous le volume local. La figure (II.5) schématise le dispositif expérimental utilisé pour la détermination des profils hydriques.



**Figure (II.5) :** Essai d'imbibition capillaire utilisé pour la détermination des profils Hydriques  $\theta(z,t)$  [36].

## II.8. Propriétés Mécaniques :

### II.8.1 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 (photos II.8) comporte deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de 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.6). 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 :

$$Rf = \frac{3F_f L}{2b^3} [\text{Pa}] \quad \dots \dots \dots \quad (\text{II.14})$$

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).

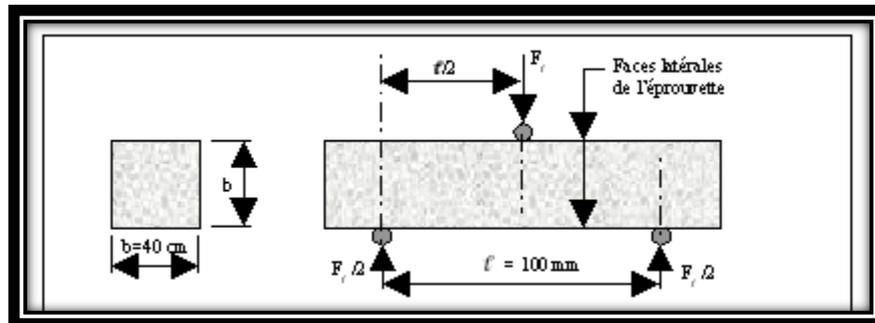
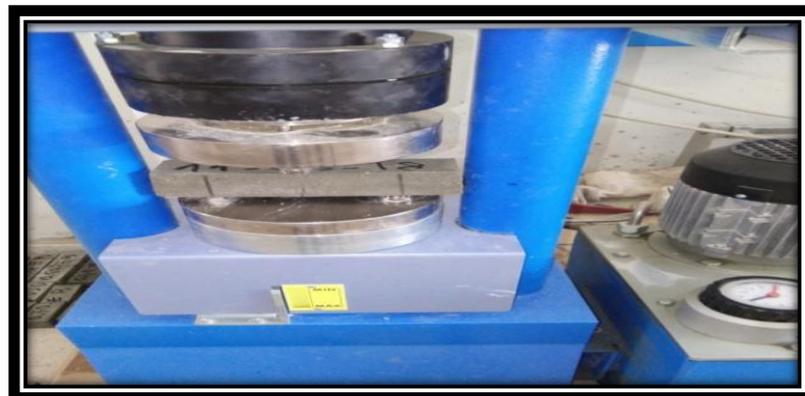


Figure (II.6) : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion



Photos(II.8) : Dispositif expérimental de l'essai de flexion

### II.8.2. Résistance à la compression : norme EN196-[21]

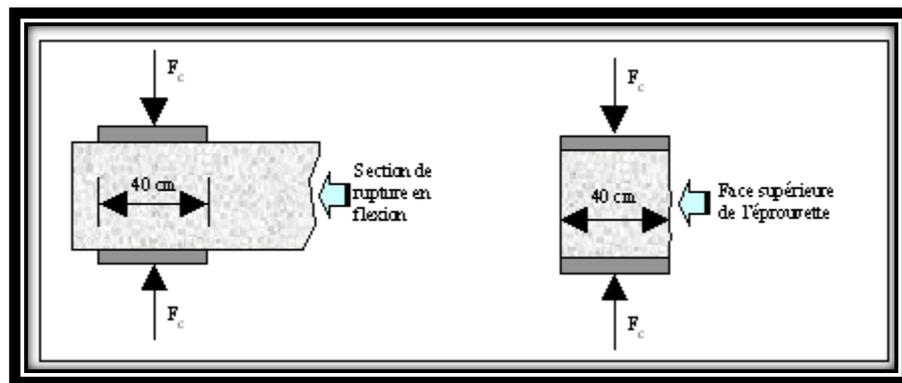
Chaque demi-éprouvette issue de l'essai de rupture par flexion est soumise à l'essai de compression sur ces faces latérales de moulage. La section visée est de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ , l'échantillon est placé entre plaque de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur et de  $(40 \pm 0.1) \text{ mm}$  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 :

$$R_c = \frac{F_c}{S} \dots \dots \dots (II.15)$$

Avec :

$F_c$  ; force de rupture ;  $S$  ; section latérale de l'éprouvette, égale à 16 cm<sup>2</sup>.

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.

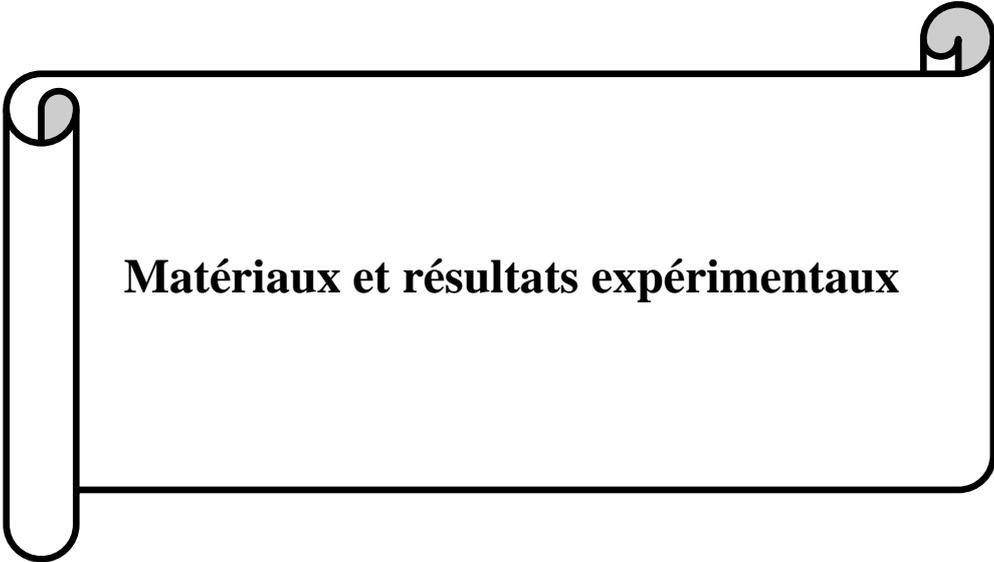


Figure(II.7) : Dispositif de l'essai de rupture en compression.

### II.9. Conclusion :

Les essais physico-mécaniques et chimiques décrits dans ce chapitre permettent de caractériser au départ la qualité les matières premières entrant dans la fabrication des mortiers étudiés. Ensuite, les essais sur les mortiers durcis permettent d'estimer les propriétés physico-mécaniques des mortiers étudiés pour les différents rapports E/C pour les trois modes cités ci-dessus.

# CHAPITRE III.



**Matériaux et résultats expérimentaux**

## **Matériaux et résultats expérimentaux**

### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre on essaye de présenter et d'expliquer les résultats expérimentaux des 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 par l'eau de robinet et l'eau magnétique aussi bien en contact avec de l'eau liquide.

Etant donné que le type de l'eau de gâchage (eau de robinet et l'eau exposé au champ magnétique), le mode de cure et le rapport E/C sont les trois paramètres variables pour les différents mortiers confectionnés, on essaye d'expliquer à chaque fois, l'influence de ces paramètres sur les propriétés physicomécaniques et hydriques des matériaux élaborés.

### **III.2. Caractérisation de matières premières utilisées:**

#### **III.2.1 sable :**

Le sable utilisé est sable alluvionnaire provenant de la zone d'oued Souf située au sud-est de l'Algérie.

##### **III.2.1.1 Analyse granulométrique :**

L'analyse granulométrique du sable employé est réalisée conformément au procédé expérimental décrit au paragraphe (II.2.1.1). Les résultats de cette analyse sont représentés dans la figure (III.1).

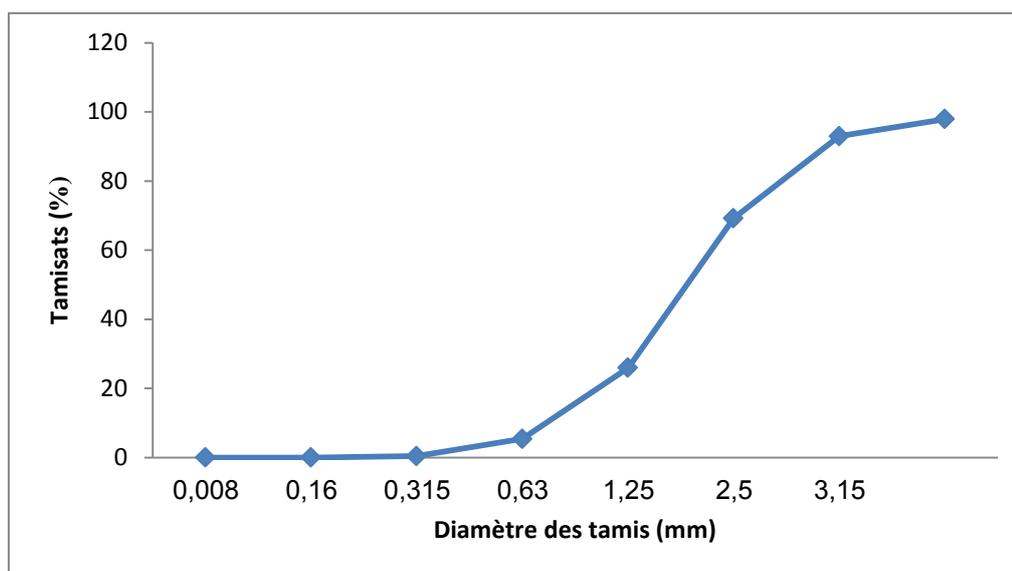


Figure (III.1) : Résultats de l'analyse granulométrique du sable utilisé

### III.2.1.2 Propriétés physico-chimiques de sable :

Les caractéristiques physiques du sable employé sont données dans tableau (III.1). L'analyse chimique qualitative réalisée par le diffractomètre aux rayons X sur un échantillon de sable (figure III.2) montre la prépondérance de l'espèce siliceuse ( $\text{SiO}_2$ ) dans la composition chimique avec quelques traces de calcite et de magnésium.

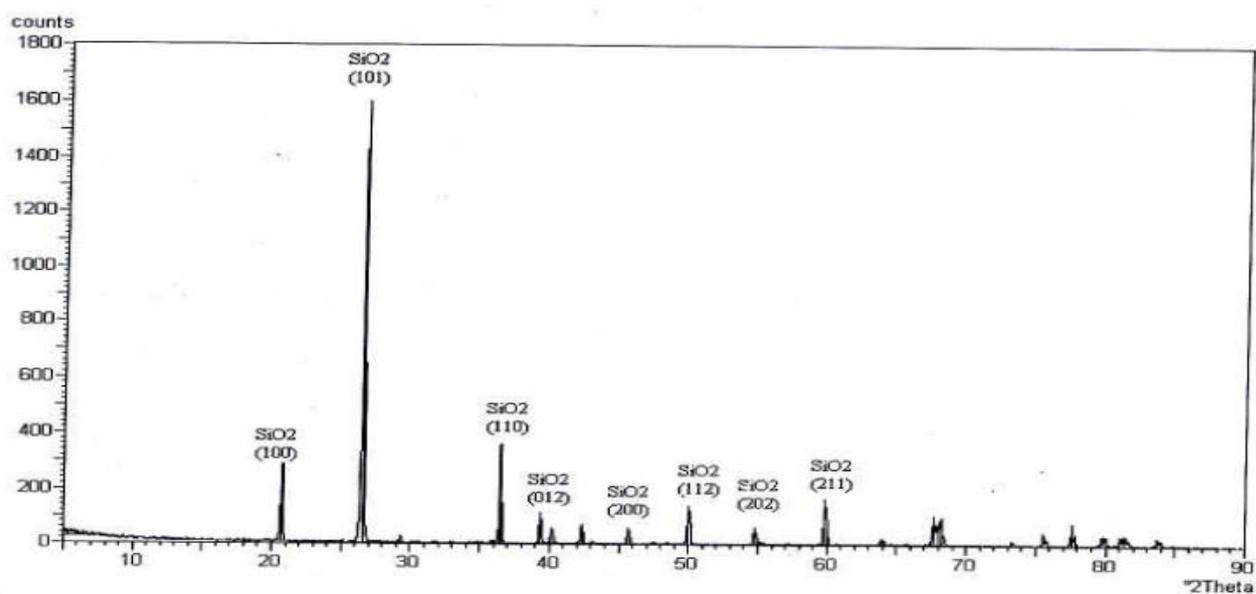


Figure (III.2) : Diagramme de diffraction aux rayons X du sable utilisé.

**Tableau (III.I) : Les propriétés physique du sable**

Equivalent de sable		$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Compacité (%)	teneur en eau (%)
ESP	ESV					
91.26	95.29	1522	2610	30	70	0.20

Ces résultats témoignent que le sable employé est un sable très propre de porosité très acceptable qui permet de composer un mortier de bonnes propriétés physique-mécanique. De plus, il s'agit d'un sable à très faible absorptivité.

### III.2.2. Ciment :

#### III.2.2.1 Propriétés de ciment :

Le ciment utilisé est un ciment Portland composé de type **CPJ 42.5** provenant de la cimenterie de M'sila. Les propriétés physiques et la composition chimique du ciment utilisé sont données respectivement dans les tableaux (III.2), (III.3).

**Tableau.III.2 : Propriétés physicomécaniques du ciment de M'sila.**

Densité apparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densité absolue (kg/m <sup>3</sup> )	Finesse de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Début de Prise (min)	Résistance en Compression à 2et à 28 jours en (MPa)	
1050	3100	3950	160	25.5	45.30

**Tableau.III.3 : Composition chimique moyenne du ciment utilisé.**

La composition chimique Moyenne en (%)								
Element	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Mgo	So <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
		17.16	4.46	3.02	63.01	2.02	2.43	0.64

### III.3.Caractérisation des mortiers étudiés :

#### III.3.1. Propriétés fraîches :

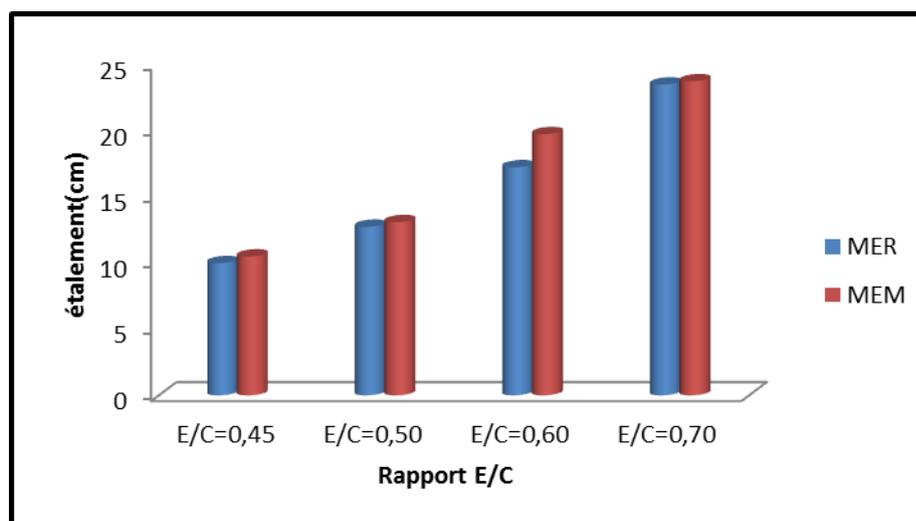
##### III.3.1.1. Consistance :

Les valeurs moyennes de l'étalement de table obtenues pour les huit mortiers étudiés sont regroupées dans le tableau (III.5) et présentées par figure(III.2).

**Tableau III.5 :** étalement de table des pâtes des mortiers élaborés

E/C	0.45		0.50		0.60		0.70	
Qualité d'eau	MER	MEM	MER	MEM	MER	MEM	MER	MEM
Etalement (cm)	10	10.5	12.75	13.1	17.25	19.75	23.5	23.75

Le graphe III.3 représente l'évolution de l'étalement de table des mortiers étudiés en fonction la qualité de l'eau de gâchage et le rapport E/C. celui montre que la variation du rapport E/C dans la fourchette : 0.45 à 0.70 produit une hausse de l'étalement de l'ordre de 235% et 237.5% pour les mortiers fabriqués par l'eau de robinet et l'eau magnétique respectivement. Par ailleurs, l'eau magnétique varie peu l'étalement de table des mortiers étudiés. Cette tendance est due à la qualité de l'eau magnétique qui a des propriétés meilleures comparativement à l'eau de robinet.



**Figure.III.3.** Evolution de l'étalement en fonction de rapport E/C.

### III.4. Propriétés physicomécaniques des mortiers à l'état durci :

#### III.4.1 Porosité accessible:

Les résultats de la porosité ouverte ou accessible des mortiers étudiés pour les deux types l'eau de gâchage sont récapitulés dans le tableau (III.7).

**Tableau(III.7) :** Masse volumique apparentes et absolues, et les porosités accessibles des différents mortiers élaborés pour les trois modes de conservation.

Rapport E/C	Environnement de conservation	Qualité D'eau	$\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon$ (%)
0.45	ENV2	MER	1994.14	7.24
		MEM	2034.17	6.67
	ENV1	MER	1962.89	7.71
		MEM	2026.36	7.13
	ENV3	MER	2054.68	7.50
		MEM	2058.59	7.63
0.50	ENV2	MER	2088.86	6.77
		MEM	2076.17	6.96
	ENV1	MER	2070.31	7.21
		MEM	2034.17	7.63
	ENV3	MER	1993.16	8.37
		MEM	1992.18	8.72
0.60	ENV2	MER	2009.76	8.26
		MEM	1963.86	9.59
	ENV1	MER	1985.35	9.69
		MEM	2012.69	9.89
	ENV3	MER	1971.67	10.35
		MEM	1919.92	10.73
0.70	ENV2	MER	1966.79	10.32
		MEM	1962.89	10.39
	ENV1	MER	1979.49	11.00
		MEM	1958.00	10.92
	ENV3	MER	1928.71	11.34
		MEM	1936.52	11.80

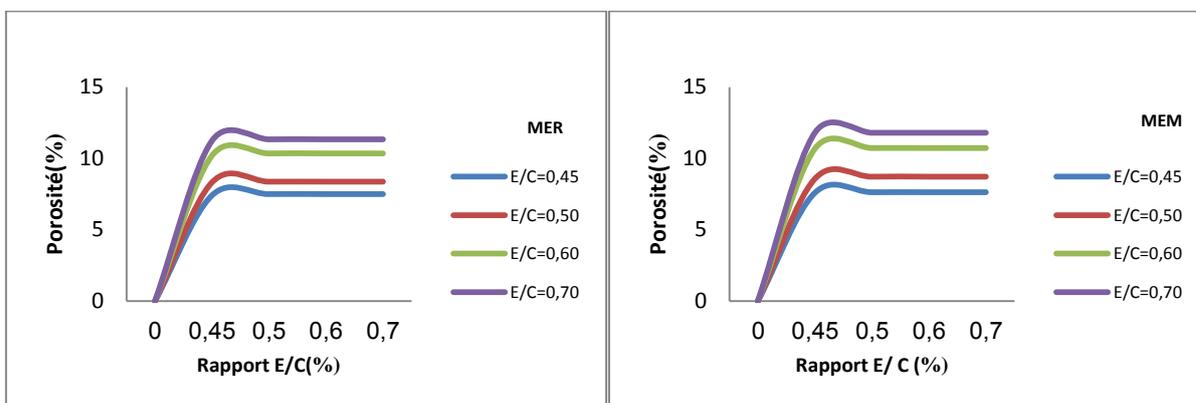
Les résultats représentés dans la figure (III.4, 5 et 6) nous notons que la de porosité accessible à l'eau est évolué proportionnellement au rapport E/C, en effet, on a enregistré la valeur la plus élevée pour rapport E/C = 0.70 et un minimum (optimale) pour un rapport E/C = 0.50. Ce comportement s'interprète par le fait que la pâte de ciment au cours de la réaction d'hydratation se combine avec une quantité d'eau bien déterminée. Si cette quantité est dépassée, l'eau en excès s'évapore au cours du temps en laissant derrière elle un réseau de pores plus ou moins interconnectés. Par contre, si la quantité d'eau employée est inférieure à

la quantité nécessaire pour accomplir les réactions d'hydrations, une fraction de ciment demeure anhydre et dont l'espace inter granulaire se trouve dépourvu de tous produit d'hydratation, cet espace s'accumule avec l'espace poral conduisant ainsi à l'augmentation de la porosité du matériau durci.

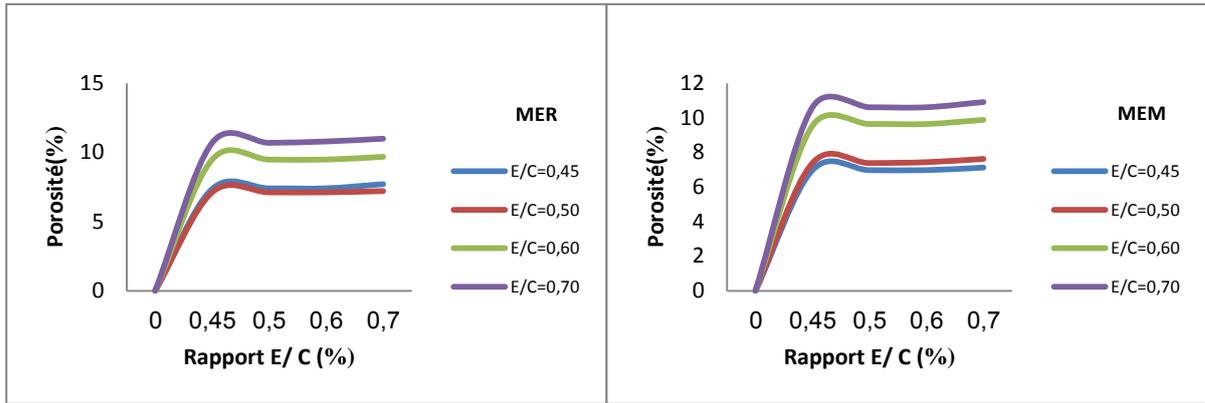
D'après ces résultats, on peut définir la quantité optimale comme étant pour laquelle la porosité est minimale. Autrement dit, les produits d'hydratation occupent dans ce cas un volume important de l'espace inter granulaire ce qui conduit à une diminution du volume poral du matériau durci.

D'après ces même résultats on constate que la porosité totale des mortiers conservés dans l'environnement sec est plus élevée que celle des mortiers conservés dans l'eau. Ceci est tout à fait évident étant donné que l'ambiance humide favorise l'accomplissement des réactions d'hydratation, alors que ces réactions peuvent être interrompues lorsque le matériau se trouve à l'aire libre, soit par l'influence de la température ou par les courants d'air. En effet, les vides seront remplis par les produits d'hydratation dans l'environnement humide plus que dans l'environnement sec.

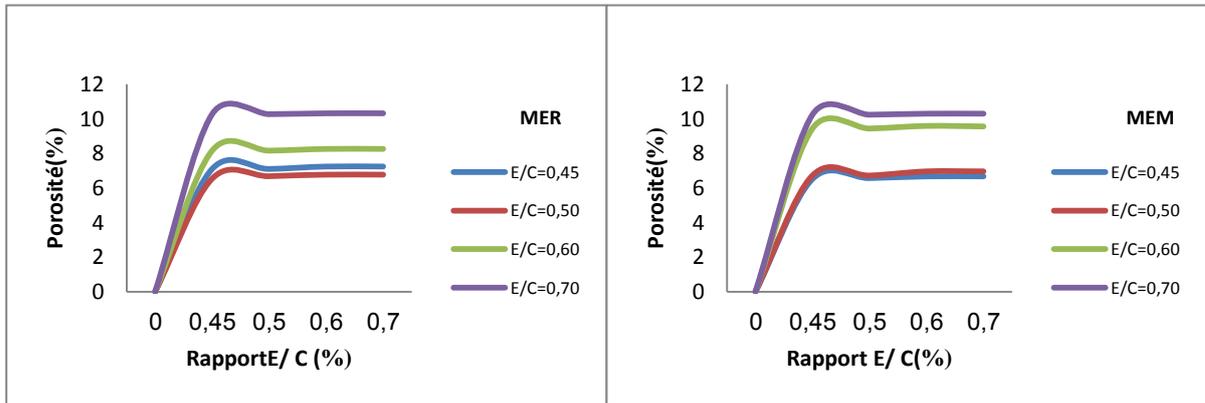
En outre, les porosités des composites gâchés avec de l'eau magnétique sont varié peu par rapport à ceux qui ont gâchés avec de l'eau de robinet.



**Figure (III.4):**L'évolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction du rapport E/C(ENV3)



**Figure(III.5):** L'évolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction du rapport E/C(ENV1)



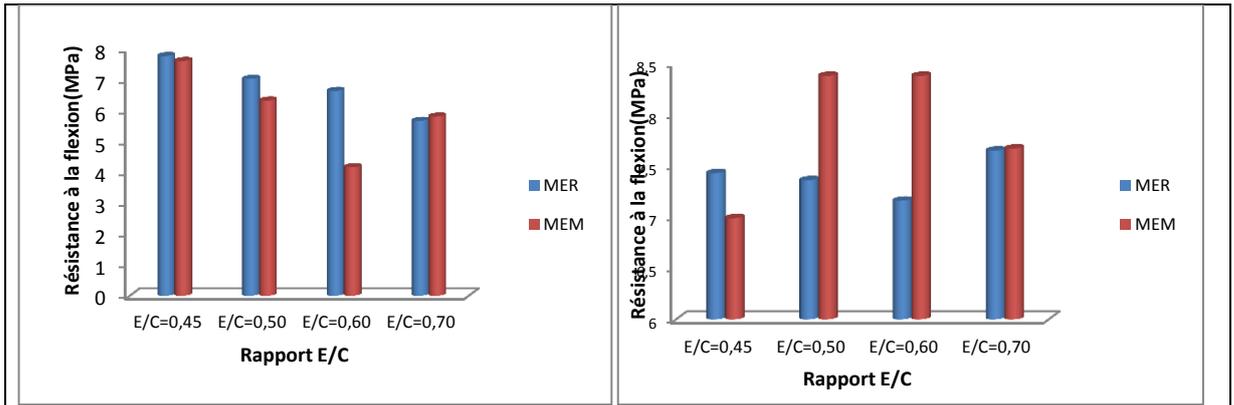
**Figure(III.6):** L'évolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction du rapport E/C(ENV2)

### III.4.2.Résistance à la flexion

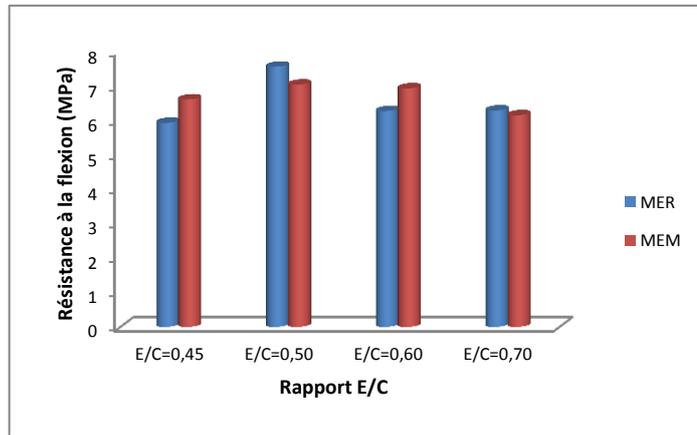
Les résultats de l'évolution de la résistance à la flexion des différents mortiers fabriqués avec deux types d'eau de gâchage pour les trois modes de conservation sont récapitulés dans le tableau (III.7) et représentés sur les figures(III.7.8.9). Ces résultats montrent que la résistance à la flexion est changée en fonction de la qualité de l'eau utilisée et ce pour les trois modes de conservation. Toutefois, cette résistance est influencée par le rapport E/C ainsi que le mode de cure.

En comparant les résultats des deux figures (III.7.8.9), on remarque que la cure humide contribue au développement de la résistance à la flexion par rapport à la cure à l'air libre on estime un gain de résistance à 28 jours jusqu' à **20 % et 17%**selon le rapport E/C pour les mortiers gâchés avec de l'eau de robinet et l'eau magnétique respectivement. Cette tendance est interprétée par l'effet que des spécimens conservés dans l'eau ont des structures plus dense et moins poreuse qui conduit à cette amélioration de la résistance à la flexion.

En outre, la conservation dans l'étude qui permet de montrer l'effet de température de l'environnement saharienne sur le développement de la structure des matériaux cimentaires. D'après les mêmes graphes cités ci-dessus, on note que la cure dans l'étuve à 105°C durant 28 jours, produit une chute de la résistance à la flexion 26 % et 50% pour l'eau de gâchage de robinet et l'eau de gâchage magnétique respectivement avec un seul exception le mortier M0.45 qui donne des résultats différents.



**Figure(III.6):** évolution de la résistance à la flexion des mortiers fonction de rapport E/C (ENV3). **Figure(III.7) :** évolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de rapport E/C(ENV2)



**Figure(III.8) :** évolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de rapport E/C (ENV1).

**Tableau (III.7) :** les résultats de la résistance à la flexion en fonction de rapport E/C des mortiers élaborés conservation trois environnements de cure.

La résistance à la compression $R_{fj}$		Qualité d'eau	$R_{f28}$
E/C	Le milieu		
0.45	ENV2	MER	7.43
		MEM	6.99
	ENV1	MER	5.93
		MEM	6.61
	ENV3	MER	7.77
		MEM	7.61
0.50	ENV2	MER	7.56
		MEM	8.38
	ENV1	MER	7.36
		MEM	7.04
	ENV3	MER	7.03
		MEM	6.33
0.60	ENV2	MER	7.16
		MEM	8.38
	ENV1	MER	6.27
		MEM	6.93
	ENV3	MER	6.64
		MEM	4.17
0.70	ENV2	MER	7.65
		MEM	7.67
	ENV1	MER	6.29
		MEM	6.15
	ENV3	MER	5.67
		MEM	5.81

### III.4.3. Résistance à la 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 hydrique. Les résultats de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction de rapport E/C des mortiers et pour les trois environnements de cure sont récapitulés dans le tableau(III.8) et représentés sur les figures (III.9.10).

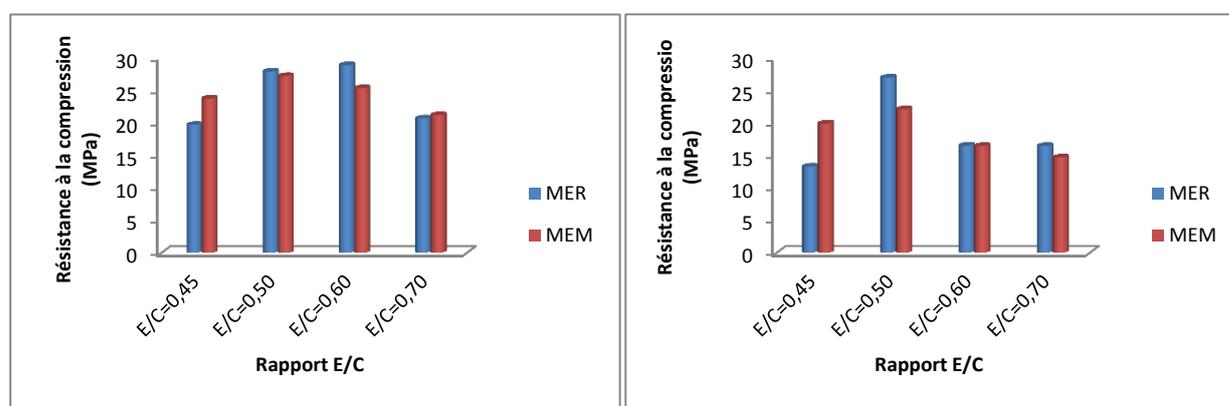
**Tableau (III.8) :** Les résultats de la résistance à la compression à différents rapport E/C et des différents mortiers pour les trois environnements de cure.

La résistance à la compression $R_{fj}$		Qualité d'eau	$R_{c28}$
E/C	Le milieu		
0.45	ENV2	MER	19.67
		MEM	23.73
	ENV1	MER	13.27
		MEM	19.95
	ENV3	MER	22.58
		MEM	20.91
0.50	ENV2	MER	27.87
		MEM	27.18
	ENV1	MER	26.95
		MEM	22.09
	ENV3	MER	20.3
		MEM	15.14
0.60	ENV2	MER	28.86
		MEM	25.32
	ENV1	MER	16.49
		MEM	16.44
	ENV3	MER	17.45
		MEM	12.95
0.70	ENV2	MER	20.67
		MEM	21.19
	ENV1	MER	16.43
		MEM	14.67
	ENV3	MER	11.60
		MEM	12.59

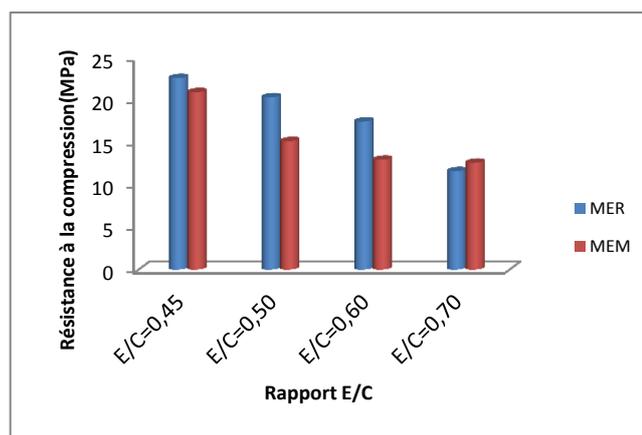
En comparant les résultats des deux figures (III.9.10.11), on remarque que la cure humide contribue au développement de la résistance à la compression par rapport à la cure à l'air libre on estime un gain de résistance à 28 jours jusqu' à **46% et 35%** pour les mortiers préparés avec de l'eau de robinet et l'eau magnétique respectivement. Cette hausse en résistance à la compression des mortiers conservés dans l'eau par rapport aux mortiers curés dans l'air de laboratoire est logique et très attendue par ce que une quantité d'eau de gâchage optimale signifie une hydratation parfait, une structure dense de volume porale minimale et une résistance très élevée. Par contre, la résistance à la compression des mortiers conservés dans l'étuve ont connu une chute importante par rapport au mortier conservé dans l'eau. La cure dans l'étuve à 105°C accélère le départ de l'eau par évaporation et ne laisse pas une quantité suffisante pour l'accomplissement de la réaction d'hydratation. L'expulsion rapide de l'eau par évaporation résulte des structures faibles de volume porale relativement élevée.

En outre, Les résultats représentés sur les figures (III.9) et (III.10) et (III.11), montrent que la résistance à compression à l'âge de 28 jours des mortiers étudiés est optimale pour un rapport E/C de 0.60 et 0.50 pour les mortiers normaux et les mortiers magnétique respectivement. D'après ce qui précède, ce rapport correspond à la porosité minimale du mortier. Ceci justifie le maximum atteint pour la résistance à la compression.

Concernant l'effet de l'eau magnétique sur la résistance à la compression, on remarque que les résultats des mortiers préparés avec de l'eau de robinet et l'eau magnétique sont convergents avec fourchette d'évolution qui est inférieure à 10%.



**Figure(III.9)** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de rapport E/C(ENV2). **Figure(III.10)** : Evolution de la résistance à la compression des Mortiers en fonction de rapport E/C(ENV1).



**Figure(III.11)** : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de rapport E/C(ENV3).

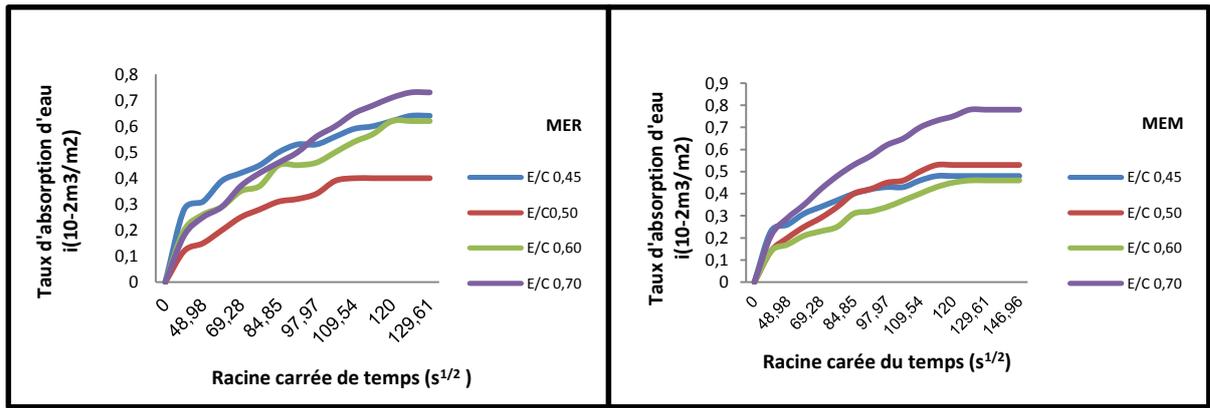
### III.5. Propriétés de transfert d'humidité en phase liquide:

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 élaborés lorsqu'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 paragraphe(II.6.2). Les paramètres de transfert à déterminer sont limités au coefficient de sorptivité  $S_w(\text{mm.h}^{-1/2})$  et le coefficient de transport capillaire ou diffusivité hydrique capillaire  $D_{0l}(\text{m}^2/\text{s})$ .

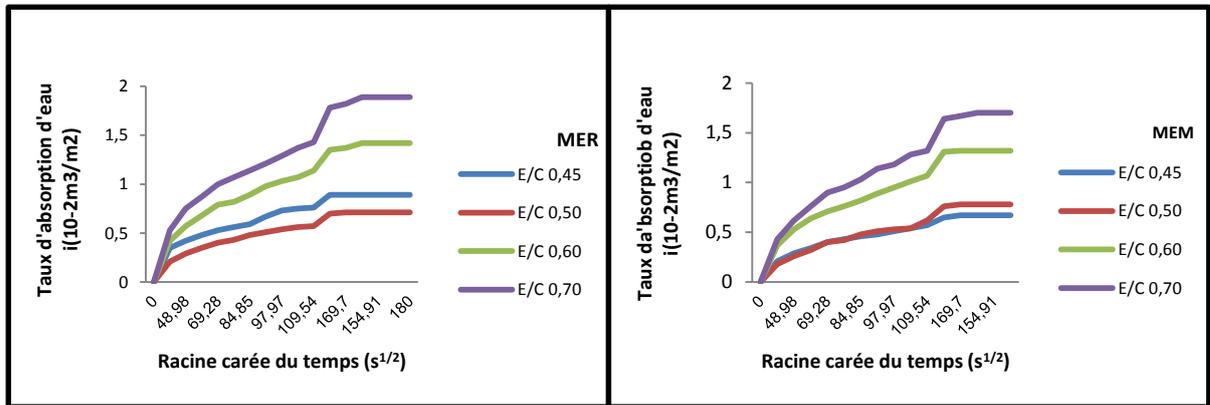
#### III.5.1.Détermination de la sorptivité:

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.

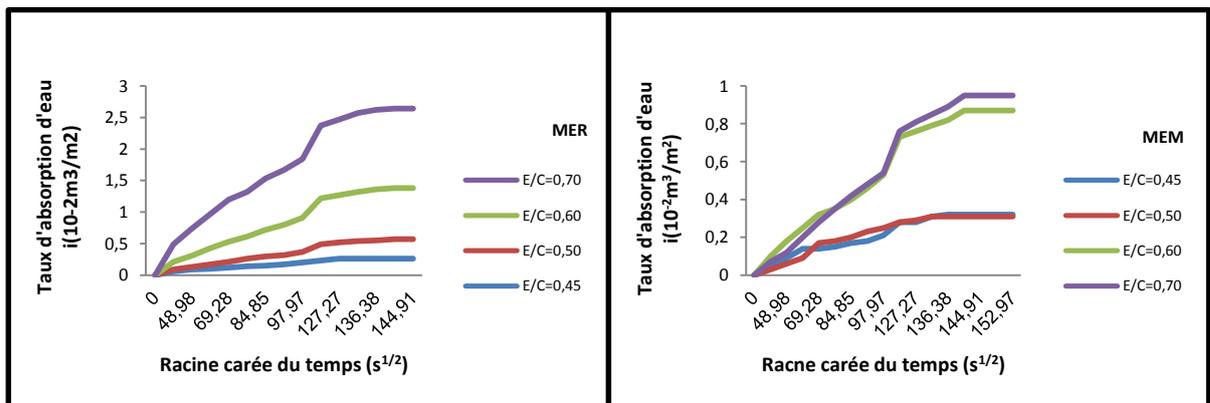
L'évolution des taux d'absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps par unité de surface a été suivi jusqu'à la stabilité de la masse de l'échantillon. Les courbes d'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps des différents mortiers sont représentées dans les tableaux suivantes (III.12) et (III.13) et (III.14) pour les trois modes de conservation.



**Figure(III.12) :** Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps et le rapport E/C (ENV2)



**Figure(III.113) :** Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps et le rapport E/C (ENV1)



**Figure(III.14) :** Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps et le rapport E/C (ENV3).

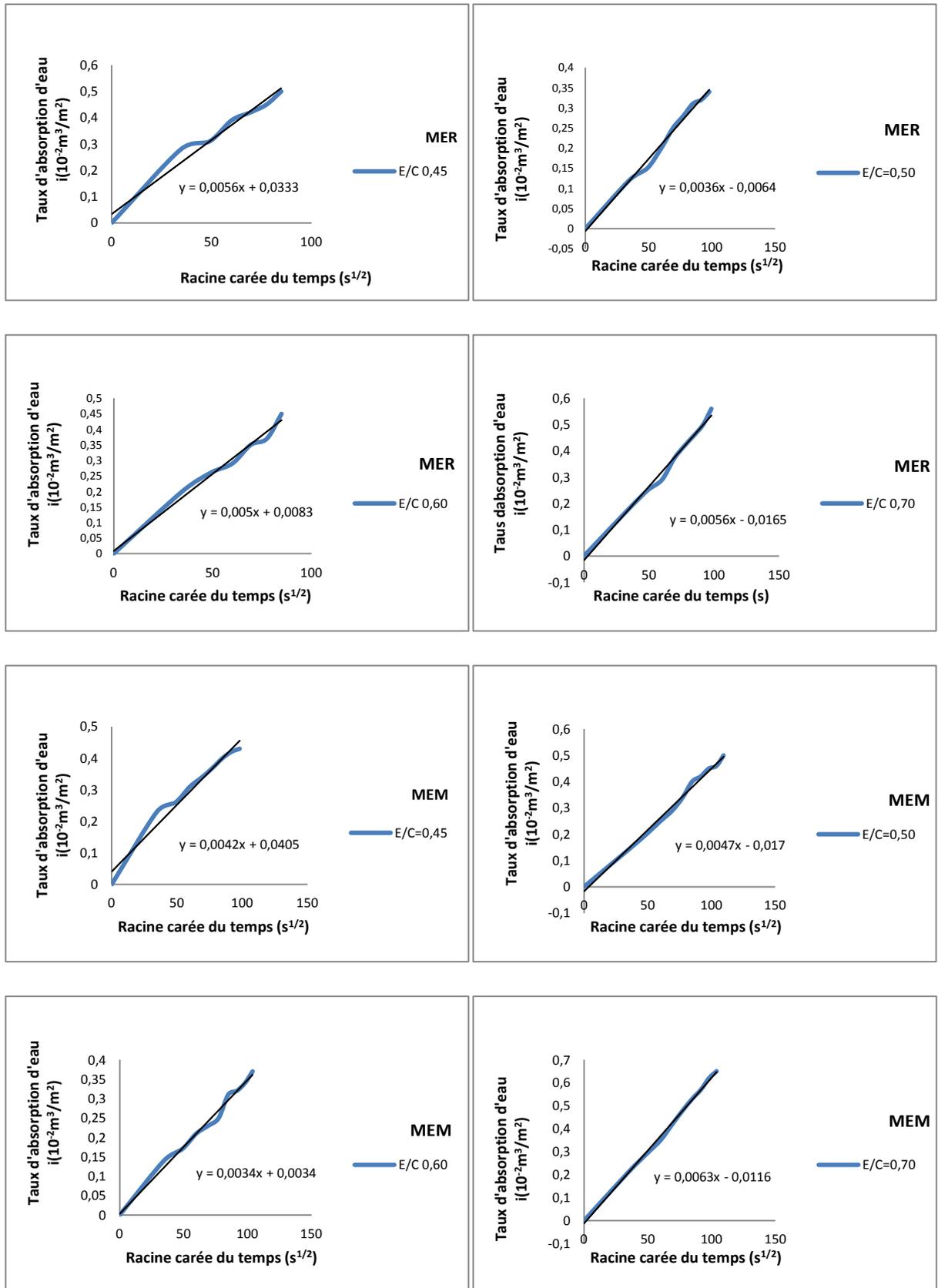
L'allure de la courbe d'évolution  $i(t^{1/2})$  est composé de deux tronçons de droite. Les premiers tronçons de pente assez forte représente l'absorption des capillaires de plus en plus fins, tandis que les deuxièmes tronçons de très faible pente représentent le remplissage graduel des capillaires 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. Celle-ci a été déterminée par le lissage des points expérimentaux par une fonction linéaire de type :

$$i = S_w \sqrt{t} + i_0$$

Où :

$S_w$  ( $\text{mm/h}^{-0.5}$ ) est appelée sorptivité ;  $i$  : le taux d'absorption initial, il caractérise le remplissage rapide des pores ouverts en surface au moment du contact de l'échantillon avec la nappe d'eau ;  $t$  est le temps en secondes.

Les résultats complets de ce test pour les différentes enveloppes de mortier et les trois environnements de conservation ont été résumés par les résultats du deuxième moyen en raison de leur similarité dans les trois différents cercles représentés dans la figure. (III.15) Les résultats de sorptivité des différents mortiers sont récapitulés dans le tableau (III.12) pour les trois environnements de conservation.

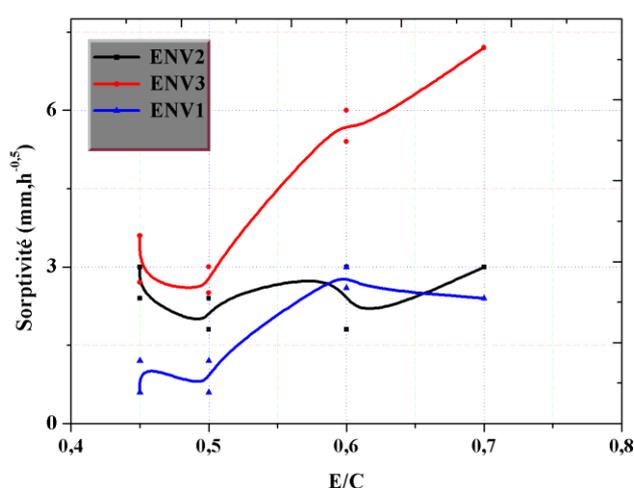


**Figure(III.15) :** Evolution du taux d'absorption des différents mortiers en fonction de la racine carrée du temps (ENV2)

**Tableau(III.12) :** les résultats de la sorptivité des différents mortiers étudiés

E/C	Qualité d'eau	Milieu de conservation			Sorptivité (mm.h <sup>-1/2</sup> )
		ENV 1	ENV3	ENV2	
0.45	MER	3.00	3.60	0.60	
	MEM	2.40	2.70	1.20	
0.50	MER	1.80	2.500	0.60	
	MEM	2.40	3.00	1.20	
0.60	MER	3.00	6.00	3.00	
	MEM	1.80	5.40	3.60	
0.70	MER	3.00	7.20	2.40	
	MEM	3.60	7.20	2.60	

D'après les résultats des figure (III.15) et récapitulés le tableau (III.12), on observe que l'air libre a une absorption très étroite malgré la différence de qualité de l'eau utilisée, alors que la qualité de l'absorption varie dans le milieu humide et sec, qui diffèrent par la proportion différent de rapport E/C.



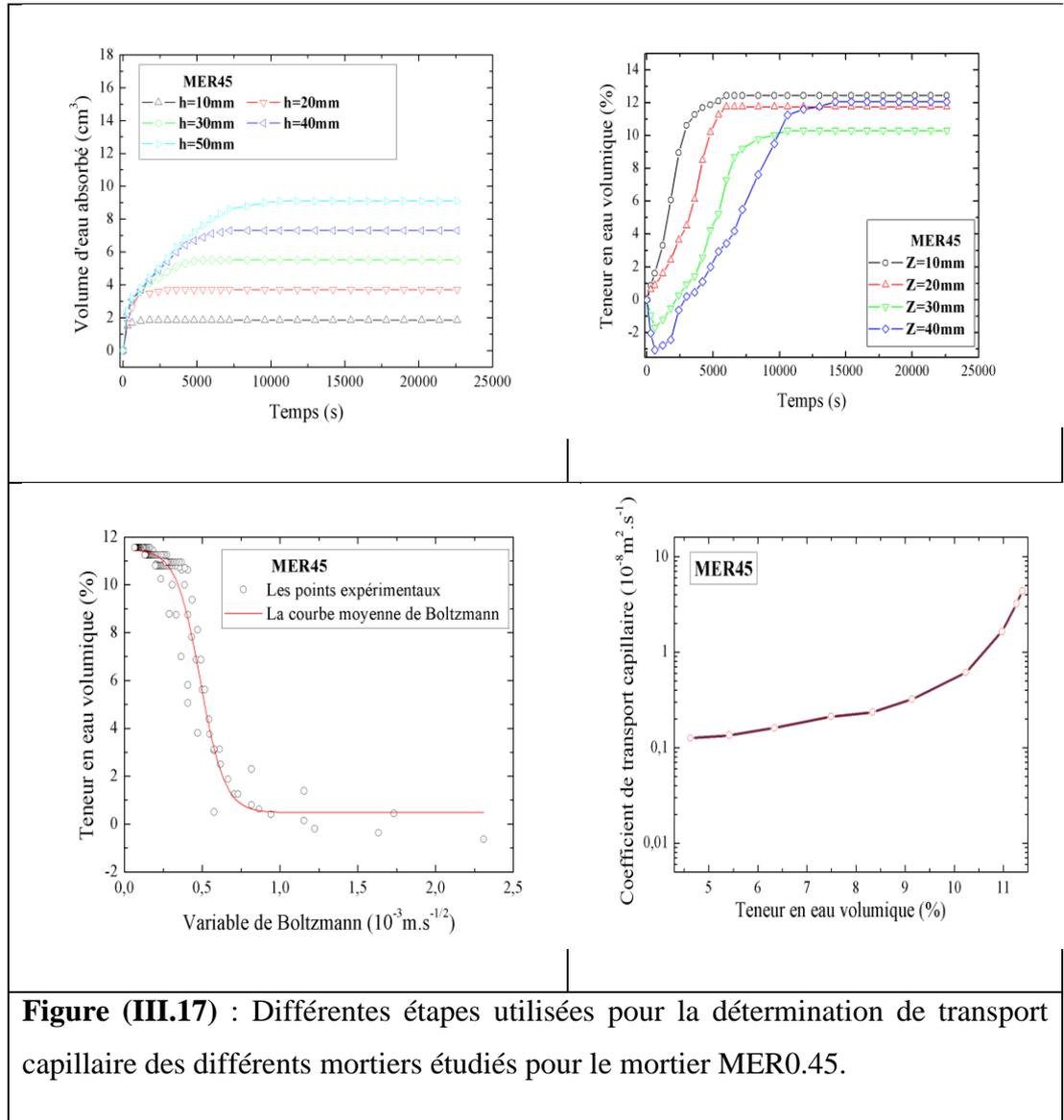
**Figure (III.16) :** Evolution de la sorptivité des mortiers étudiés en fonction de rapport E/C.

En traçant la variation de la sorptivité des différents mortiers en fonction du rapport E/C (figure III.16), on remarque la sorptivité évolue proportionnellement au rapport E/C avec quelques exception pour le mortier M0.45. Par ailleurs, les spécimens conservés dans l'étuve (ENV3) donnent des sorptivité les plus élevées en comparaison avec les autres milieux de conservation. Par contre, la conservation dans l'eau donne les valeurs de sorptivité le plus élevées. Cette tendance est raisonnable par ce que la sorptivité est en relation avec la régularité de réseau poreux qui est plus fin pour les spécimens conservés dans l'eau (pores capillaire minimale). De plus, dû à la complexité de la morphologie de la structure poreuse et même au mode opératoire, qui ne peut en aucun cas être le même pour les différents mortiers élaborés. Donc, une étude microstructure approfondie est nécessaire afin d'expliquer de tels phénomène.

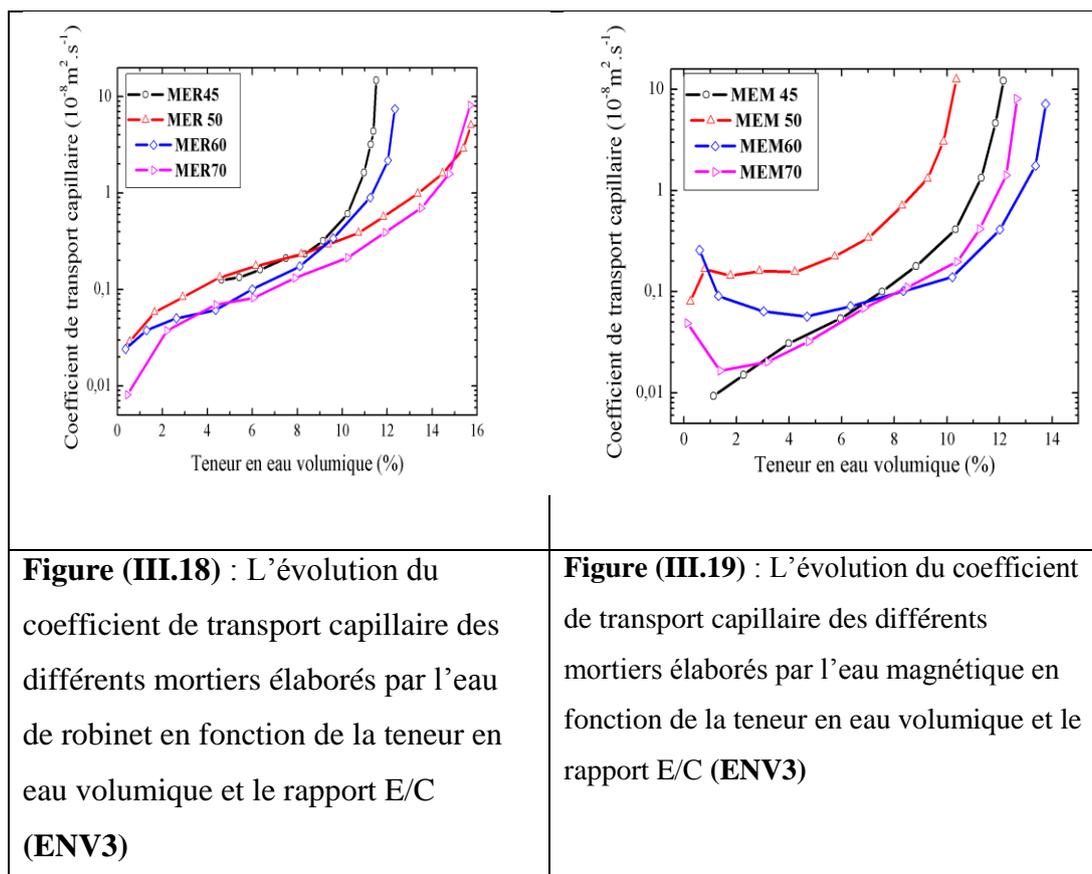
### III.5.2.Détermination du coefficient de transport capillaire $D_{\theta 1}$ :

Les profils hydriques  $\theta(x,t)$  des mortiers étudiés ont été déterminés conformément à la procédure expérimentale exposée dans le chapitre II. Le profile hydrique type  $\theta(b)$  regroupant les profils spatio-temporels  $\theta(x,t)$  en un seul profile a été tracé en utilisant la transformée de Boltzmann  $b=x.t^{-1/2}$ .

Les différentes étapes de détermination des profils hydriques  $\theta(z,t)$  sont illustrées en étudiant l'exemple du mortier avec E/C=0.45 (figure III.17).



Les figures (III.18) et (III.19) expriment pour les trois modes de conservation, l'évolution du coefficient de transport capillaire des différents mortiers élaborés en fonction de la teneur volumique en eau.



D'après les résultats des figures (III.18) et (III.19) on constate que la diffusivité hydrique capillaire ou le coefficient de transport capillaire  $D\theta l$  évoluent entre  $10^{-10}$  et  $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , cette même fourchette a été trouvée par B. Perrin [34] pour le cas d'un mortier normal ( $E/C=0.50$ ). De plus, elle croît en fonction de la teneur en eau. Cette croissance est presque insensible pour des faibles teneurs en humidité. Par contre, elle évolue très rapidement lorsque la teneur en eau franchit le seuil de saturation du matériau. Ceci peut être interprété en s'inspirant des travaux de D.A. De Vries [26] :

1/Aux faibles teneurs en eau ( $\theta < \theta_r$ ), la phase condensée se présente sous forme adsorbée ou dans des îlots capillaires isolés. Le transfert en phase vapeur est seul en jeu.

2/Lorsque la teneur en eau augmente de plus en plus, les îlots capillaires augmentent en taille et en nombre. Ici il y a une diffusion mixte liquide - vapeur. Dès que la continuité de la phase liquide s'établit ( $\theta = \theta_r$ ), le coefficient  $D\theta l$  augmente au détriment du transfert en phase vapeur  $D\theta_v$ .

3/ Lorsque la teneur en eau dans le matériau est proche de la teneur de saturation, le transfert en phase liquide devient nettement prépondérant. Les résultats regroupés dans les figures (III.18) et (III.19) montrent l'influence du rapport E/C sur l'évolution du coefficient de

transport capillaire. On montre comment il est difficile d'interpréter ces résultats qui sont pratiquement aléatoire, ceux-ci sont fortement influencés par les propriétés structurales de l'espace poreux qui sont les suivantes:

- Le degré de connectivité du réseau poreux.
- La distribution des diamètres de pores.
- Le taux de porosité ouverte.

En outre, l'effet de type d'eau est peu influé le coefficient de transport capillaire presque les variations de cette coefficient sont dans la même fourchette pour les mortiers fabriqué avec l'eau de robinet et les autres mortiers fabriqués avec de l'eau exposé au champ magnétique statique.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion générale et recommandations

L'objectif de cette étude est d'évaluer le transfert des propriétés d'humidité dans les obus de mortier de durcissement du ciment dans des conditions d'humidité et de différentes évaluation des relations existantes entre poreux et a noté ici le changement dans le rapport de E / C et des mécanismes différents pour le transfert d'humidité dans un matériau poreux de génie civil. Pour atteindre cet objectif, ce travail a été réalisé à travers une revue des documents de mortier béton, l'impact du rapport E / C, la qualité de l'eau utilisée pour la porosité, les propriétés physiques des mortiers et enfin les différents mécanismes et modèles de transport. Cette section a été suivie d'une description des méthodes expérimentales utilisées pour évaluer les différentes caractéristiques des mortiers, en particulier les propriétés physiques et mécaniques, et, enfin, la dernière partie qui combine les résultats expérimentaux et leurs interprétations. Ces résultats ont révélé les points suivants :

- La présence de différents pourcentages de rapport E / C ainsi que la qualité de l'eau utilisée nous permettent d'enregistrer différentes proportions de porosité en changeant le rapport E / C, où le rapport de porosité est grand à E / C = 0,70.
- Le traitement humide améliore significativement les performances physico-mécanique du mortier par rapport à l'air et aux milieux chauds. En outre, la valeur de la force de compression a été estimée à 28MPa, ce dernier variant avec le rapport E / C de 0,45 à 0,70.
- La porosité varie en fonction du rapport E/C. Où la valeur maximale est E/C = 0,70. Le pourcentage de rapport E/C diminue, quel que soit le mode de cure et la qualité d'eau.
- le phénomène de sorption et de désorption est irréversible. les différentes isothermes établies présentent une hystérésis qui explique que l'énergie développée en sorption est différente que celle développée en désorption en raison de la variation de la géométrie des pores. généralement en fait allusion au phénomène de bouteille d'encre pour interpréter cette hystérésis.
- Afin de transférer l'humidité dans la phase liquide, on a observé que l'activité du mortier étudié était très faible et variait de 0,60 à 3,60 pour l'eau normale, tandis que les valeurs de 1,20 à 7,20 étaient limitées à l'eau magnétisée.

- Le traitement humide à tendance à réduire le mélange par rapport au traitement à sec Les coefficients de transport capillaire du mortier étudié sont également très faibles. Où il augmente rapidement lorsque la teneur en eau atteint le seuil de saturation des mortiers.
- la relation entre la sorptivité et le rapport  $e/c$  ainsi que le coefficient de transport capillaire et le rapport  $e/c$  sont pratiquement difficile à dévoiler, ceci est du à la complexité du transfert d'humidité à travers la microstructure du mortier. celui-ci est contraint par la morphologie de la structure poreuse, la distribution porométrique en taille et en nombre et du degré de connectivité entre les différentes branches du réseau poreux. une étude approfondie de la microstructure par imagerie RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) est la seule capable d'explicitier cette relation.

L'étude du problème de transfert d'humidité dans les matériaux poreux est un sujet très vaste et en ne peut en aucun cas être investi en un sujet de magister. Ce mémoire n'a traité qu'un cas particulier de transfert pour un matériau bien spécifié, c'est le cas de transfert d'humidité dans les mortiers de ciment dans des conditions isothermes. Alors que la température a une influence non négligeable sur les propriétés des fluides et sur leurs transferts dans les milieux poreux. De plus, l'étude de la microstructure est un volet aussi très important de par son influence sur le transport d'humidité en milieu poreux. Sur ce, on recommande d'approfondir cette étude en étudiant l'influence de la température et qualité de l'eau utilisé et de la morphologie de la structure poreuse sur le transfert d'humidité dans les mortiers de ciments afin d'apprécier convenablement leurs performances, notamment, leur durabilité vis-à-vis des agents agressifs.

## Référence bibliographiques :

- [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](http://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 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] Philippe Vallée, Etude de l'effet de champ électromagnétiques basse fréquence sur les propriétés physico-chimiques de l'eau, thèse de doctorat, Université Paris VI, pp.164 (2004), France.

[22] B. Perrin, Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans les matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil, thèse de doctorat d'état, Université Paul Sabatier, Toulouse, pp.267 (1985), France.

[23] M.S. Goual, F. De Barquin, M.L. Benmalek, A. Bali, M. Quéneudec, Estimation of the capillary transport coefficient of Clayey Aerated Concrete using a gravimetric technique, Cement and Concrete Research, vol.30, pp 201-207 ( Juillet 2000).