

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**

**Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg**



**Département de Génie Civil**

**Laboratoire ICUBE de l'INSA de Strasbourg**

**Mémoire de projet de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie civil**

Thème :

**Caractéristiques physico-chimiques de différents types de mortiers**

**Réalisé par :**

ALI AZOUAOU Ghenima

**Encadré par :**

Mme Françoise FEUGEAS

Mme Ratiba KATTAB

Soutenu publiquement : le 16 Juin 2016

**Composition du jury :**

Président

Pr. A. BALI

Professeur à l'ENP

Rapporteur

Pr. R. KETTAB

Professeur à l'ENP

Examineurs

Dr. R. BOUTEMEUR

MAA à l'ENP

Mme. N.BAUCHE

MAA à l'ENP

**ENP 2016**

---

## Remerciements

Le travail présenté à travers ce document a été réalisé à l'INSA de Strasbourg au sein de l'équipe Génie Civil et Énergétique (GCE) du laboratoire ICUBE. De nombreuses personnes ont contribué à sa réalisation et je tiens à les en remercier ici.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus sincères remerciements à Mme Françoise FEUGEAS de m'avoir accueilli au sein de son équipe et de m'avoir donné la chance de travailler sous sa bienveillance et son encadrement. Son aide mais également ses critiques, son soutien ainsi que sa confiance m'ont permis de bien mener cette étude.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur Mme Ratiba KETTAB professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'elle m'a fait d'encadrer ce travail, pour ses grandes qualités pédagogiques, pour sa rigueur scientifique, pour l'aide précieuse et l'intérêt constant qu'elle a bien voulu montrer pour mener à bien ce travail.

Je remercie Mme Charlotte Munzer, en fin de thèse au sein de l'INSA de Strasbourg, pour son aide, ses critiques, ses conseils mais aussi pour le temps qu'elle m'aura accordé. En effet, sans elle, mon projet de recherche n'aurait pas pu aboutir. Elle a su être conciliante et me fournir des réponses concrètes dans ce projet compliqué.

Je souhaite remercier chaleureusement Mme Essia BELHADJ, maître de conférences au sein de l'INSA de Strasbourg pour son soutien et son aide. Je n'oublie pas les encouragements et le soutien de Calypso CHADEFAU, doctorante en 1<sup>ère</sup> année au sein de l'INSA de Strasbourg.

Mes sincères reconnaissances à tous les enseignants du Département de Génie Civil de l'école nationale polytechnique ENP.

Je souhaite aussi remercier les membres du jury de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail de mémoire.

---

---

## Dédicaces

### Je dédie ce travail :

- A mes chers parents, à qui je dois tout : ma vie, ma réussite et mon épanouissement. Eux qui ont tout donné pour faire de moi celle que je suis aujourd'hui,
- A ma grande sœur Sarah et mon beau frère Noureddine, mes modèles, qui m'ont toujours montré le chemin à suivre,
- A mes frères et sœurs, Youcef, Amer, Tarek, Sofia et Hany, pour leur grand amour et leur soutien,
- A mes meilleures amies, Naziha, Djow, Kahina et Hadjer avec qui j'ai grandi, appris et vécu tant de moments inoubliables,
- A Inaam, mon pilier depuis mon arrivée à l'ENP, celle qui a rendu l'ambiance des études agréable et à Zaki et Yanis, qui m'a toujours aidé et encouragé et avec qui j'ai partagé tant de fous rires,
- A mes amis de la prépa et de l'ENP, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables,
- A mes amis de Strasbourg : Assia, Myriam et Kathie, grâce auxquels j'ai pu surmonter des moments difficiles et qui, à leur manière, ont su les transformer en des moments de joie,
- A toute ma famille,
- A tous ceux qui m'ont aidé et soutenu

*Mille mercis*

---

## المخلص :

الإسمنت، المستخدم بشكل كبير في الهندسة المدنية مادة مركبة أكثر فأكثر. في الواقع، مكوناته المتعددة تسمح له بالتأقلم مع استعمالات كثيرة و امتلاك مؤهلات مثل المتانة الاستثنائية و الميزات الميكانيكية والجمالية الهامة. حاليا يتم بذل جهود للتقليص من التأثيرات البيئية على الإسمنت. هذا العمل يندرج ضمن مشروع "SEPOLBE" الذي يهدف إلى استحداث مواد مضافة / مساعدة محترمة للبيئة. الهدف الأساسي هو إبراز خصائص المقذوفات المخصبة لمضاف طبيعي مصنوع من مواد خارج-خلوية مشتقة من بكتيريا وفق بروتوكول أصلي. لقد تم استخدام المقذوفات ذات قاعدة شبيهة بالإسمنت في هذا المشروع، إسمنتيات بورتلاندية "CEM I" مكونة غالبا من الكلينكر و الإسمنت "CEM II" و "CEM III" المكون من صهارة الأفران العالية والتي تشكل هدف هذه الدراسة. في إطار هذا العمل، لقد تم تقييم المسامية المتاحة للماء وفق المعيار " أن أف 18-459" و شعرية المضافات استنادا للمعيار " أن أف إن 18-480-5".

**الكلمات مفتاحية:** المقذوفات، المضافات الطبيعية، الخصائص الفيزيوكيميائية ، المسامية، الريولوجيا، شبه إسمنتية، الشعرية.

## Abstract:

The concrete, abundantly used in the civil engineer, is an increasingly complex composite material. Indeed, the various components of this material enable him to adapt to very different uses and to have qualities such as: exceptional durability, mechanical performances and important esthetics. Currently, efforts are carried out in order to reduce the environmental impact of the concretes. This work is the part of SEPOLBE project, which aims to develop eco-friendly admixtures. The active principle of this admixture is made of extra-cellular substances, secreted by microorganisms into their surroundings. It contributes to the effort in sustainable development that consists to limit the impact of buildings on environment and human health, with a guarantee of better quality concerning esthetical, durability and resistance criteria, according to the REACH regulation. A study of the physicochemical characteristics of bioadmixture mortars is carried out with an aim of developing the use of eco-more-respectful concretes by improving their chemical composition and their durability. The action of the biological product used was evaluated as well on its capacity to modify the porous network of the mortars as on its effects over rheology in a fresh state and the time of catch of the mortars thus making possible to qualify this product like additive. Mortars containing different cementing nuances are used in this project, of Portland cements CEM I clinker compound mainly and of cements CEM II and CEM III compounds of blast-furnace slag are the object of this study. Within the framework of this work, we evaluated total porosity accessible to water according to standard NF 18-459 and the capillarity from the mortars while taking as a starting point the standard NF EN480-5.

**Key words:** mortars, bioadmixture, physicochemical characteristics, porosity, rheology, cementing nuances, capillary.

---

## Résumé :

Le béton, abondamment utilisé dans le génie civil, est un matériau composite de plus en plus complexe. En effet, les différents composants de ce matériau lui permettent de s'adapter à des usages très différents et d'avoir des qualités telles que : durabilité exceptionnelle, performances mécaniques et esthétiques importantes. Actuellement, des efforts sont effectués afin de réduire l'impact environnemental des bétons. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet SEPOLBE qui a pour ambition d'élaborer des adjuvants respectueux de l'environnement. Le but principal étant de mettre en évidence les propriétés de mortiers enrichis d'un bio-adjuvant fabriqué à partir de produits extracellulaires issus de bactéries selon un protocole original. Une étude des caractéristiques physico-chimiques de mortiers bioadjuvantés est effectuée dans le but de développer l'usage des bétons plus éco-respectueux en améliorant leur composition chimique et leur durabilité. L'action du produit biologique utilisé a été évaluée aussi bien sur sa capacité à modifier le réseau poreux des mortiers que sur ses effets sur la rhéologie à l'état frais et le temps de prise des mortiers permettant ainsi de qualifier ce produit comme adjuvant. Des mortiers à base de nuances cimentaires différentes sont utilisés dans ce projet, des ciments Portland CEM I composé majoritairement de clinker et des ciments CEM II et CEM III composés de laitiers de haut fourneau font l'objet de cette étude. Dans le cadre de ce travail, nous avons évalué la porosité totale accessible à l'eau selon la norme NF 18-459 et la capillarité des mortiers en s'inspirant de la norme NF EN 480-5.

**Mots clés :** mortiers, bio-adjuvant, caractéristiques physico-chimiques, porosité, rhéologie, nuances cimentaires, capillarité.

---

---

## Table de matières

liste des tableaux

liste des figures

Introduction générale .....	14
Chapitre I : Microstructure et hydratation des ciments.....	17
I.1. Introduction :.....	18
I.2. Constituants du béton :.....	18
I.2.1 Les granulats .....	18
I.2.2 L'Eau.....	19
I.2.3 le Ciment .....	19
I.2.4 Les adjuvants.....	19
I.3. Le Mortier:.....	20
I.3.1. Les mortiers de ciment :.....	20
I.3.2. Les mortiers de chaux : .....	21
I.3.3. Les mortiers bâtards (mixtes) :.....	21
I.4. L'hydratation des ciments:.....	21
I.4.1 Introduction .....	21
I.4.2 Nomenclature cimentière .....	21
I.4.3 Classification des ciments .....	22
I.4.4 Composition du ciment Portland.....	23
I.4.5 Mécanisme chimique d'hydratation .....	25
I.5. Le laitier de haut-fourneau :.....	31
I.5.1. Histoire du laitier de haut fourneau.....	31
I.5.2. Composition chimique du laitier de haut fourneau .....	31
I.5.3. Différents types de ciment de haut fourneau :.....	33

---

---

I.6. Caractéristiques de la microstructure de la pâte de ciment :.....	33
I.7. Influence du rapport E/C sur l'hydratation des ciments : .....	35
I.8. Conclusion : .....	36
Chapitre II : Propriétés des bétons à l'état frais .....	37
II.1. Introduction : .....	38
II.2. Ouvrabilité :.....	38
II.3. Rhéologie du mortier et du béton frais : .....	39
II.3.1. Définition de la rhéologie .....	39
II.3.2. Equations générales .....	39
III.3.3. Modèles rhéologiques appliquées aux bétons et aux mortiers .....	43
III.3.4. Dispositifs expérimentaux .....	49
III.4. Le temps de prise : .....	51
III.5. Influence de la température sur les propriétés des bétons à l'état frais :.....	52
III.6. Conclusion :.....	53
Chapitre III : Structure poreuse des bétons et les propriétés de transferts .....	54
III.1. Introduction : .....	55
III.2. Définitions et caractérisation de la structure poreuse des bétons :.....	56
III.2.1. Description physique d'un matériau poreux.....	56
III.2.2. Classification des pores : .....	56
III.3. Les matériaux poreux, paramètres descriptifs de leur structure :.....	61
III.3.1. La porosité .....	61
III.3.2. La connectivité .....	62
III.3.3. La tortuosité .....	63
III.3.4. La résistivité électrique.....	64
III.4. Propriétés de transfert : .....	64
III.4.1. La perméabilité :.....	64
III.4.2. La diffusion.....	65

---

---

III.5. Paramètres influençant la structure poreuse du béton :.....	66
III.5.1. La teneur en eau E/C .....	66
III.5.2. Influence de la durée de cure humide .....	68
III.5.3. Influence du degré de saturation.....	69
III.5.4. Influence de la température .....	69
III.6. Capillarité :.....	70
III.6.1. Tension interfaciale fluide/fluide - tension superficielle.....	70
III.6.2. Tension interfaciale fluide/solide – mouillabilité.....	70
III.6.3. Capillarité – pression capillaire .....	71
III.6.4. Imbibition/drainage – aspect dynamique de la capillarité .....	73
III.7. Conclusion :.....	75
Chapitre IV : Procédures expérimentales .....	76
IV.1. Introduction :.....	77
IV.2. Matériaux utilisés :.....	77
IV.2.1. Le bio-adjuvant : .....	77
IV.2.2. Ciments :.....	78
IV.3. Préparation des échantillons : .....	79
IV.3.1. composition :.....	79
IV.3.2. Fabrication des échantillons :.....	80
IV.4. Essai d'affaissement «mini cône » :.....	81
IV.4.1. Procédure de l'essai.....	81
IV.4.2. Détermination de la classe d'affaissement .....	82
IV.5. Le temps de prise (L'aiguille de Vicat) : .....	83
IV.6. Essai de porosité : .....	85
IV.7. Essai imbibition capillaire :.....	88
IV.7.1. Principe de la méthode .....	88
IV.7.2. Mode expérimental.....	88

---



---

IV.7.3. Définitions .....	89
IV.8. Conclusion : .....	90
Chapitre V : Présentation et interprétation des résultats .....	91
V.1. Introduction : .....	92
V.2. Etude de l'ouvrabilité de mortier : .....	92
V.3. Le temps de prise (l'aiguille de Vicat) : .....	95
V.4. Porosité : .....	96
V.4.1. Porosité totale accessible à l'eau .....	96
V.4.2. Masse volumique apparente .....	100
V.5. Imbibition capillaire : .....	101
V.5.1. Prise de masse .....	102
V.5.2. Montée capillaire .....	106
V.6. Conclusion : .....	110
Conclusion générale et perspectives .....	111
Références bibliographique .....	114
Annexes.....	118

---

---

## Liste des tableaux

Tableau I. 1: La notation cimentaire .....	21
Tableau I. 2: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [2]. .....	22
Tableau I. 3: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe de résistance [2]. ....	23
Tableau I. 4 : Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment portland. .....	24
Tableau I. 5 : Produits d'hydratation du clinker. ....	29
Tableau I. 6: Composition chimique de différents types de laitier de haut fourneau [6]. ....	32
Tableau II. 1: Classes d'affaissement selon la norme NF-EN 206-1 .....	50
Tableau II. 2 : Dimensions du cône d'Abrams et du mini-cône. ....	50
Tableau II. 3 : Classes d'affaissements du béton et du mortier. ....	51
Tableau III. 1: Classification des pores.....	57
Tableau III. 2: Définition des différents types de porosité d'un matériau. ....	62
Tableau IV.1: Caractéristiques spécifiques et composition chimiques des nuances cimentaires utilisées. ....	78
Tableau IV. 2: Composition des échantillons de mortier. ....	79
Tableau IV. 3: Classe d'affaissement du mortier.....	82
Tableau V. 1 : Tableau comparatif de la teneur en air et la porosité .....	100
Tableau V. 2: Caractéristiques des échantillons utilisés pour les essais d'imbibition capillaire. .....	101

---

---

## Liste des figures

Figure I.1: Clinker du ciment Portland [3].....	25
Figure I.2: Courbe calorimétrique de l'hydratation d'un ciment Portland [3].....	25
Figure I.3 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [4]. .....	27
Figure I.4: Morphologie du C-S-H [5].....	30
Figure I.5: image en microscopie électronique à balayage de cristaux de portlandite (courtoisie D. Damidot). .....	31
Figure I.6 : Représentation bidimensionnelle de l'empilement de grains de ciment dans la pâte [5]. .....	34
Figure II.1: Quelques dispositifs pour étudier la rhéologie des matériaux cimentaires.....	49
Figure II.2 : Les trois phases d'hydratation de la pâte de ciment (source : Wikipédia.com). ..	51
Figure II.3 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants [21]. .....	52
Figure III.1: Description schématique d'un matériau poreux [18] .....	55
Figure III.2: Schématisation macroscopique d'un matériau poreux dans un état hydrique quelconque (source : Wikipédia.com) .....	56
Figure III.3 : Échelle des différentes gammes de pores dans un mortier [7]. .....	57
Figure III.4 : Modèle de Feldman et Sereda, revu par Sierra 1982 [19]. .....	58
Figure III.5: Schéma de la zone de transition interfaciale [7]. .....	59
Figure III.6: Schéma de différentes formes de porosité dans la pâte de ciment durcie [13]. ..	60
Figure III.7: Classification des pores selon différents auteurs [20]. .....	60
Figure III.8: Influence du degré d'inter-connectivité sur la perméabilité de la pâte [4]. .....	62
Figure III.9: Influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de pâtes de ciment Portland âgées de 28 jours [28]. .....	66
Figure III.10: Interconnexion du réseau des pores capillaires [18]. .....	67
Figure III.11: Influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la continuité des pores capillaires [18]. .....	68
Figure III.12: Évolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure [29]. .....	69

---

---

Figure III.13: Représentation schématique de l'équilibre des forces de tensions interfaciales s'exerçant sur la périphérie d'une goutte de liquide déposée sur un solide [34].	71
Figure III.14: Représentation schématique des forces appliquées de part et d'autre d'un ménisque dans un capillaire [34].	72
Figure IV.1: Descriptif du test d'affaissement [35].	81
Figure IV.2: Appareil de Vicat et son aiguille (source : memoireonline.com).	83
Figure IV.3: Schéma représentant l'essai.	86
Figure IV.4: appareillage à vide.	87
Figure IV.5: matériel de la pesée hydrostatique.	87
Figure IV.6: Dispositif montrant une absorption capillaire par un échantillon de mortier reposant sur un géotextile [7].	89
Figure V. 1: Histogramme des résultats de l'affaissement des échantillons de mortiers CEM I témoins et adjuvantés.	92
Figure V. 2: Histogramme des résultats de l'affaissement des échantillons de mortiers CEM II et CEM III témoins et adjuvantés avec un rapport E/C = 0,5.	93
Figure V. 3 : Résistance à la compression pour les mortiers à base de CEM I en fonction de la concentration en bio-adjuvant et du temps de cure [35].	94
Figure V. 4 : Résistance à la flexion du mortier à base de CEM I en fonction de la concentration en bio-adjuvant et le temps de cure [35].	95
Figure V. 5: Graphiques représentant l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans un mortier témoin et un mortier adjuvanté avec un rapport E/C = 0,5.	96
Figure V. 6: Porosité totale accessible à l'eau de mortier à base de CEM I témoin et adjuvanté.	96
Figure V. 7: Porosité totale accessible à l'eau de mortier à base de CEM II témoin et adjuvanté.	97
Figure V. 8: Moyenne de la porosité totale accessible à l'eau des échantillons de mortiers à base de CEM III témoins et adjuvantés avec l'écart type.	98
Figure V. 9: Porosité totale accessible à l'eau des différents mortiers étudiés.	99
Figure V. 10: Moyenne de la masse volumique apparente des échantillons de mortiers à base de CEM I et CEM III témoins et adjuvantés avec l'écart type.	100

---

---

Figure V. 11: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM I témoins et adjuvés (surface d'imbibition 25mm <sup>2</sup> ). .....	102
Figure V. 12: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM I témoins et adjuvés (surface d'imbibition 8mm <sup>2</sup> ). .....	103
Figure V. 13: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM II témoins et adjuvés (surface d'imbibition 25mm <sup>2</sup> ). .....	104
Figure V. 14: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM III témoins et adjuvés (surface d'imbibition 8mm <sup>2</sup> ). .....	105
Figure V. 15 : Schéma explicatif des mesures de la montée capillaire d'un échantillon de mortier.....	106
Figure V. 16: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM I témoins et adjuvés (50*50*50 mm <sup>3</sup> ). .....	107
Figure V. 17: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM I témoins et adjuvés (40*40*20 mm <sup>3</sup> ). .....	107
Figure V. 18: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM II témoins et adjuvés (50*50*50 mm <sup>3</sup> ). .....	108
Figure V. 19: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM III témoins et adjuvés (40*40*20 mm <sup>3</sup> ). .....	108

---

## Introduction générale

---

Aujourd'hui, il est important de s'intéresser au développement des bétons plus éco-respectueux, puisque les bâtiments ont une durée de vie limitée et ils sont amenés à être déconstruits. Lors de cette déconstruction, le maximum de matériaux est recyclé, et il paraît donc évident qu'un béton éco-respectueux sera plus facilement recyclé et réemployé par la suite. Cette problématique de développement de béton plus respectueux concerne le projet SEPOLBE programme de recherche en partenariat avec les laboratoires ICube, LISE, INRA-B<sub>2</sub>HM et LPSC et l'entreprise CHRYSO.

Le projet SEPOLBE (Substance Extra-cellulaires POur Les BEtons), a pour but l'élaboration d'adjuvants respectueux de l'environnement. Ces adjuvants devront remplacer des produits soumis à autorisation REACH afin de remplir deux fonctions à la fois : limiter la bio-contamination de la surface des bétons et améliorer la résistance à la corrosion de leurs armatures. Il existe déjà des adjuvants qui permettent de limiter la corrosion des armatures. Mais il s'agit de la première tentative en ce qui concerne la facilité à nettoyer la surface d'un béton. Le but du projet SEPOLBE est de rendre les bétons plus respectueux de l'environnement en substituant aux adjuvants écotoxiques une substance d'origine bactérienne. Ce bio-adjuvant devrait permettre d'inhiber la corrosion et de faciliter le nettoyage des surfaces du béton. Pour cela le bio-adjuvant devra limiter la bio-contamination de la surface du béton.

Avec le temps, Les matériaux cimentaires subissent l'effet de divers facteurs, comme le vent, le soleil, la pluie, les cycles gel/dégel, le CO<sub>2</sub> atmosphérique... Ces matériaux sont également sensibles à la colonisation biologique, qui provoque divers problèmes : esthétique, sanitaires... En outre, les micro-organismes (les bactéries, les algues ...) peuvent conduire à la biodégradation ou la biodétérioration des matériaux cimentaires [1].

La plupart des bétons sont adjuvantés afin d'optimiser leurs performances d'ouvrabilité, mécaniques et de durabilité. L'utilisation des adjuvants peut permettre d'améliorer certaines propriétés dans le volume (porosité...), ou au niveau de la surface (rugosité, composition chimique...) des matériaux cimentaires, et ainsi de modifier leur bioréceptivité c'est-à-dire leur capacité à être colonisés par des micro-organismes. Cependant, les adjuvants chimiques présentent certains inconvénients comme celui d'engendrer une pollution environnementale aussi bien lors de leur fabrication que lors de leur utilisation. Compte tenu de ces inconvénients, les bio-adjuvants apparaissent particulièrement intéressants, en raison de leurs propriétés plus respectueuses de l'environnement. Les bio-

adjuvants sont des adjuvants dont le principe actif est constitué de polymères biosourcés, de produits issus de substances biodégradables ou encore de biopolymères. Certaines espèces bactériennes sécrètent des biopolymères tels que des Substances Extra Polymériques comme les ExoPolySaccharides EPS 180 sécrétés par les bactéries reuteri présentant des propriétés inhibitrices de corrosion pour les aciers aux carbones immergés en eau de mer naturelle.

Mon projet de recherche poursuit les travaux d'autres projets. Ces derniers ont prouvé l'efficacité du bio-adjuvant concernant le maintien des propriétés mécaniques (compression et traction) des mortiers à base de ciment CEM I, CEM II et CEM III.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet d'un bio-adjuvant élaboré à partir de substances extra- cellulaires sur les propriétés physico-chimiques. Afin de bien analyser l'influence de ce produit sur le comportement physico-chimique des mortiers, plusieurs essais ont été réalisés sur des mortiers témoins et adjuvantés, réalisés à base de différentes nuances cimentaires (CEM I, CEM II et CEM III). Le présent mémoire comporte cinq parties :

- Le premier chapitre fait l'objet d'une étude bibliographique ayant pour but de mieux connaître les comportements des constituants de bétons en particulier le ciment ; en effet le ciment est considéré comme l'élément le plus important du béton.
- Le deuxième chapitre est consacré aux propriétés à l'état frais des bétons et mortiers. Une étude bibliographique concernant la rhéologie des bétons et les paramètres qui l'influencent, a été effectuée et les essais empiriques caractérisant ce paramètre ont été présentés.
- Le troisième chapitre de ce travail aborde une recherche bibliographique sur la structure poreuse des bétons et les propriétés de transferts.
- Le quatrième chapitre traitera la partie expérimentale. En effet, le protocole expérimental est représenté dans ce chapitre.
- le cinquième chapitre présente les résultats de la campagne expérimentale menée sur l'étude physico-chimique de différents types de mortiers.
- Enfin, une conclusion générale rappelant les résultats obtenus est donnée.



**Chapitre I : Microstructure et hydratation des ciments**

---

## I.1. Introduction :

Nous allons commencer cette étude par une présentation du matériau béton et des différents ingrédients nécessaires à sa fabrication.

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde ; il est composé de granulats (Sables, Graviers) liés entre eux par un liant hydraulique : le ciment, et contient souvent des adjuvants (des plastifiants, des fluidifiants,...).

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique est présentée concernant le constituant le plus important du béton, en l'occurrence le ciment. En effet, la plupart des propriétés du béton et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de la pâte de ciment hydratée.

## I.2. Constituants du béton :

### I.2.1 Les granulats

Les granulats (Sables et Graviers) sont des matériaux naturels utilisés depuis toujours par l'homme ; ils constituent le squelette en principe inerte du béton (sauf cas pathologique, comme par exemple celui d'une réaction alcali-granulat). Ils sont agglomérés par le liant pour former une « pierre artificielle » et confèrent ainsi au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique.

Pour que le squelette soit le plus compact et le plus durable possible, il est nécessaire que les granulats satisfassent à des exigences tant au niveau de leur nature (pétrographie, minéralogie), qu'au niveau de leur géométrie (taille, forme). Ainsi, la compacité (C) du mélange des granulats utilisés, définie par :

$$C = \frac{V_{\text{squelettegranulaire}}}{V_{\text{totla}}}$$

va être conditionnée par la courbe granulométrique et, pratiquement, par l'étendue granulaire, c'est-à-dire le rapport des tailles extrêmes. La compacité sera optimisée par une courbe granulométrique étalée. Il convient de tenir compte de l'eau absorbée par les granulats ; on parle alors de l'eau efficace pour l'hydratation du ciment [2].

### **I.2.2 L'Eau**

L'Eau est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite la mise en œuvre du béton dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui peut conduire à la ségrégation des granulats et diminuer les résistances et la durabilité du béton.

Le rapport E/C est un critère important de formulation de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité (résistance mécanique à la compression, durabilité...).

### **I.2.3 le Ciment**

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau une pâte plastique liante. Le ciment est un liant hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours le maximum de résistance. Après durcissement cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau ; il se solidifie en réagissant avec l'eau (hydratation) pour produire des composés (hydrates) qui sont stables dans l'eau.

Le durcissement du ciment est dû à l'hydratation de certains composés minéraux tels que les silicates et les aluminates de calcium.

### **I.2.4 Les adjuvants**

Dès les origines de la fabrication du béton de ciment Portland, les recherches sur l'incorporation de produits susceptibles d'améliorer certaines de ses propriétés ont commencé. On cherche à agir sur les temps de prise, les caractéristiques mécaniques et de mise en œuvre et la porosité. Dès 1881, Candlot étudie l'action des accélérateurs et des retardateurs de prise. Le sucre est déjà connu comme retardateur de prise et souvent employé à partir de 1909. Entre 1910 et 1920, débute la commercialisation d'hydrofuges et d'accélérateurs à base de chlorure de calcium. À partir de 1930, les entraîneurs d'air sont fréquemment utilisés. Ils seront suivis par les antigels et les produits de cure.

Un adjuvant est un produit, qui ajouté au béton en faible quantité (en général moins de 5 % du poids du ciment) permet d'améliorer certaines propriétés ou qualités désirées sur un béton frais ou sur un béton durci.

L'utilisation des adjuvants pour la production de béton de structures doit respecter les exigences de la norme NF EN 206-1 [2].

La classification des adjuvants repose essentiellement sur les propriétés qu'ils confèrent au béton frais ou durci. La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants:

- Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton: Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité. La frontière entre les différents types d'adjuvants de cette famille n'est pas toujours très nette, les effets recherchés sont très proches et les différences obtenues sont souvent une question de nuances liées aux dosages préconisés tels que : plastifiants-réducteurs d'eau, superplastifiants (anciennement fluidifiants);
- Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement: Ces adjuvants sont des produits chimiques, qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution du seuil de cisaillement dans le temps, en fonction de l'adjuvant utilisé, à titre d'exemple, les accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise;
- Les adjuvants modifiant certaines propriétés particulières: Tels que les entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse.

L'utilisation de tous les adjuvants ainsi que la détermination des dosages optimums nécessitent des recherches approfondies.

### **I.3. Le Mortier:**

Le mortier est un mélange de liant hydraulique (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Selon les performances souhaitées, on utilise des formulations variées, notamment en ce qui concerne les liants.

#### **I.3.1. Les mortiers de ciment :**

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1m<sup>3</sup> de sable.

### I.3.2. Les mortiers de chaux :

Les mortiers de chaux sont gras et onctueux. Ils durcissent plus lentement que les mortiers de ciment, surtout lorsque la chaux est calcique.

### I.3.3. Les mortiers bâtards (mixtes) :

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande de l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

## I.4. L'hydratation des ciments:

### I.4.1 Introduction

Le ciment est un matériau qu'on croit connaître tant il est courant. On l'emploie en effet pour fabriquer le matériau de construction le plus utilisé au monde en l'occurrence : le béton ; la raison en est son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et sa disponibilité pratiquement universelle. Il suffit, en effet, de mélanger un peu de ciment avec de l'eau, du sable et des graviers pour obtenir, à température ambiante et en quelques heures, un matériau dur. Bien que le béton soit le matériau de construction le plus utilisé au monde [2], tous les processus physico-chimiques à la base de cette transformation ne sont pas complètement bien compris et font encore l'objet de recherches. On s'intéressera essentiellement à l'aspect chimique des transformations, c'est ce qu'on appelle d'une manière générale l'hydratation. C'est un ensemble de processus physico-chimiques qui obéissent aux lois générales de la thermodynamique et de la cinétique.

### I.4.2 Nomenclature cimentière

En chimie des ciments, on a l'habitude d'utiliser une nomenclature particulière pour écrire les transformations chimiques ; celle-ci utilise l'initiale des oxydes en place des symboles chimiques classiques (Tableau I.1) :

**Tableau I. 1:La notation cimentaire**

Constituants	La Silice $\text{SiO}_2$	La chaux $\text{CaO}$	L'alluminate $\text{Al}_2\text{O}_3$	La ferrite $\text{Fe}_2\text{O}_3$	L'eau $\text{H}_2\text{O}$
Notation	S	C	A	F	H
Constituants	Le trioxyde de soufre ( $\text{SO}_3$ )	La magnésie ( $\text{MgO}$ )	L'oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ )	L'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )
Notation	$\bar{S}$	M	K	N	$\bar{C}$

### I.4.3 Classification des ciments

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition ou de leur résistance à la compression.

a) Classification des ciments en fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en cinq types. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur appellation européenne.

- ✓ CEM I: Ciment Portland ;
- ✓ CEM II: Ciment Portland composé ;
- ✓ CEM III: Ciment de haut fourneau ;
- ✓ CEM IV: Ciment Pouzzolanique ;
- ✓ CEM V: Ciment aux laitiers et aux cendres.

Le tableau I.2 représente les proportions en masse des différents constituants du ciment.

**Tableau I. 2: Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition [2].**

	Cim. 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	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/36% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
Laitier (S)	*	6% ≤	21% ≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
Pouzzolanes (Z)	*	total	total	*	*	*	10% ≤		18% ≤	31% ≤
Cendres siliceuses (V)	*	≤20%	≤35%	*	*	*	≤35%		≤30%	≤50%
Fumés de silice (D)	*	(fumée de	(fumée de	*	*	*	(fumée ≤ 10%)		*	*
Cendres calciques (w)	*	Silice	Silice	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	≤10%)	≤10%)	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	*
Fillers (F)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

(\*) : Constituants secondaires pour le ciment considéré.

## b) Classification des ciments en fonction de leur résistance

Il existe trois classes de ciment en fonction de la résistance à la compression à 28 jours ; ces classes sont notées : 32.5 ; 42.5 et 52.5. Afin de désigner les ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées des sous classes « R » sont associées à ces trois classes. (Tableau I.3).

**Tableau I. 3: Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe de résistance [2].**

Désignation de la classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante à 28 jours	
	A 2 jours	A 7 jours		
32.5 N	–	$\geq 16$	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
32.5 R	$\geq 10$	–		
42.5 N	$\geq 10$	–	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
42.5 R	$\geq 20$	–		
52.5 N	$\geq 20$	–	$\geq 52.5$	–
52.5 R	$\geq 30$	–		

#### I.4.4 Composition du ciment Portland

Le ciment Portland est obtenu à partir d'un mélange de 80% de calcaire (carbonate de chaux) et de 20% d'argile, broyé et mélangé formant le cru, puis cuit à 1450°C pour obtenir une roche artificielle très dure : Le Clinker, qui, broyé à nouveau très finement, donne le ciment Portland.

Le ciment Portland est un mélange de clinker, de gypse (ou anhydrites) et, la plupart du temps d'ajouts minéraux tels que les fillers (calcite).

La composition minéralogique moyenne du clinker de ciment Portland est donnée dans le tableau I.4 :

**Tableau I. 4 : Composition minéralogique moyenne typique d'un clinker de ciment portland.**

Constituants	Formule Brute	Notation Cimentaire	% massique des différentes phases dans le clinker
Le silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60-65
Le silicate bicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	10-20
L'aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	8-12
Le ferroaluminate tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8-10

- L'alite :

L'alite pure est formée de 75 % de chaux (CaO) et de 25 % de silice (SiO<sub>2</sub>). Elle peut contenir de nombreuses autres traces d'oxydes. Elle possède de nombreuses formes allotropiques différentes en fonction de la température.

- La bélite :

La bélite pure est formée de 66 % de chaux (CaO) et de 33 % de silice (SiO<sub>2</sub>) ; elle peut contenir de d'autres traces d'oxydes, notamment Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Elle possède quelques formes allotropiques.

- Les ferrites :

Ils sont formés de 66 % de chaux (CaO), de 16 % d'aluminate (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de 16 % de ferrite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). On l'appelle aussi brown-millerite. Ce cristal donne sa couleur au ciment. Il est ferrimagnétique.

- Les aluminates :

Les aluminates purs sont formés de 75 % de chaux (CaO) et de 25 % d'aluminate (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Elle peut contenir de d'autres traces d'oxydes, notamment Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et SiO<sub>2</sub>. Elle possède quelques formes allotropiques.



Le caractère hétérogène du clinker est illustré sur la figure I.1 :

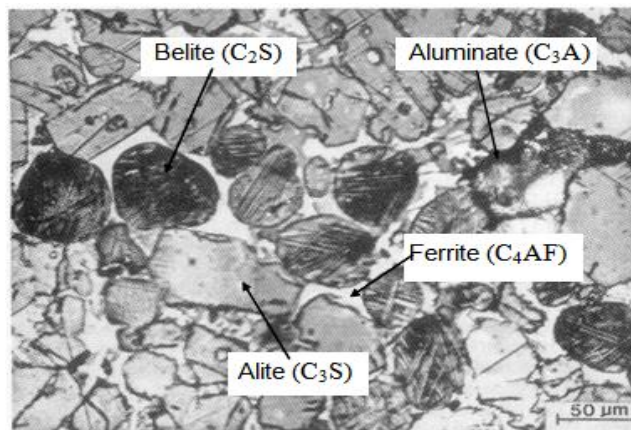


Figure I. 1: Clinker du ciment Portland [3].

#### I.4.5 Mécanisme chimique d'hydratation

##### a) Introduction

L'hydratation des ciments est un phénomène complexe mettant en jeu des réactions chimiques entre les composants du ciment et l'eau de gâchage. Ce processus physico-chimique est à l'origine de la prise et du durcissement de la matrice cimentaire. L'hydratation du ciment s'opère par dissolution des solides anhydres et précipitation d'hydrates qui forment une structure mécaniquement stable (Théorie de Le Chatelier).

La figure I.2, représente l'évolution du flux de chaleur, qui passe par cinq périodes [3]:

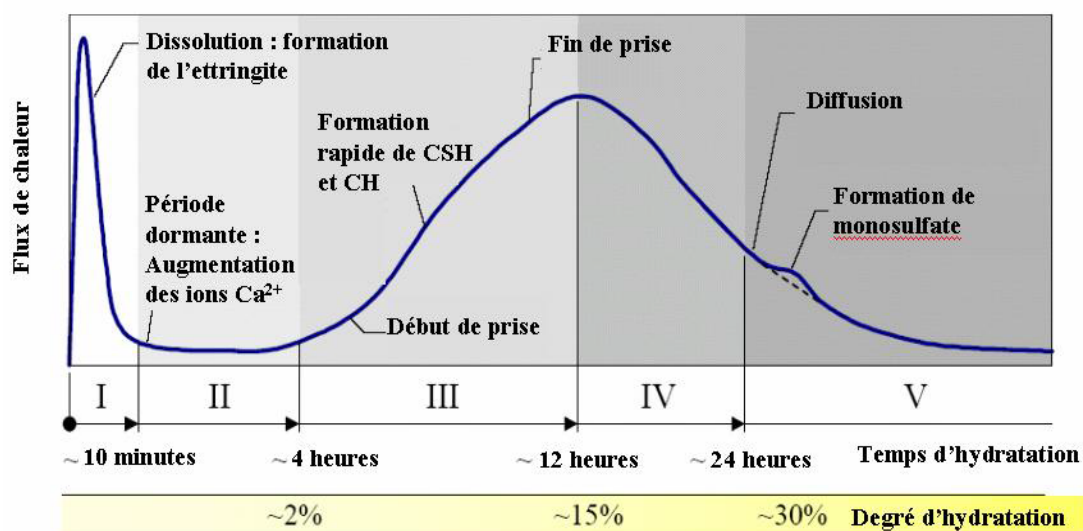


Figure I. 2: Courbe calorimétrique de l'hydratation d'un ciment Portland [3].

### Période 1 : « Période de gâchage »

Dès que le ciment entre en contact avec l'eau, la dissolution partielle des grains anhydres engendre un premier pic important de dégagement de chaleur. Les réactions entre le  $C_3S$  et l'eau commencent et génèrent également un dégagement important et rapide de chaleur. Il se forme alors des C-S-H et de l'ettringite. La durée de cette période est très courte, environ 10 minutes.

### Période 2 : « Période dormante »

Cette phase correspond à un dégagement de chaleur relativement faible, bien que non nul. Durant cette période, des ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  sont libérés. Ceci augmente le pH de la solution jusqu'à environ 12,5 et ralentit la dissolution des constituants. Le dégagement de chaleur est alors faible.

### Période 3 : « Période de prise ou d'accélération »

Cette étape met fin à la période dormante. Il se produit alors une accélération du dégagement de chaleur. Ce dernier atteint un pic généralement entre 9 et 10 heures pour une pâte de ciment Portland conservée à 20°C. Cette phase débute lorsque la concentration de la solution en ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  devient critique. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (C-S-H) et des phases cristallines (principalement portlandite et ettringite). Cette grande activité chimique dégage beaucoup de chaleur, augmentant la température du matériau. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et permettent alors la formation d'un solide rigide.

### Période 4 : « Période de décélération »

On assiste à une décélération de la réaction d'hydratation du  $C_3S$ . La couche d'hydrates s'épaissit autour des grains anhydres et rend plus difficiles les échanges ioniques. Les réactions de précipitation-dissolution sont alors progressivement remplacées par un processus diffusionnel.

### Période 5 : « Période de réaction lente »

Cette dernière période correspond à un dégagement de chaleur faible et décroissant (non nul) mais continu. Le système réagit lentement et les réactions d'hydratation se déroulent uniquement par un processus diffusionnel pendant des mois, voire des années.

## b) La structure de la pâte de ciment hydratée

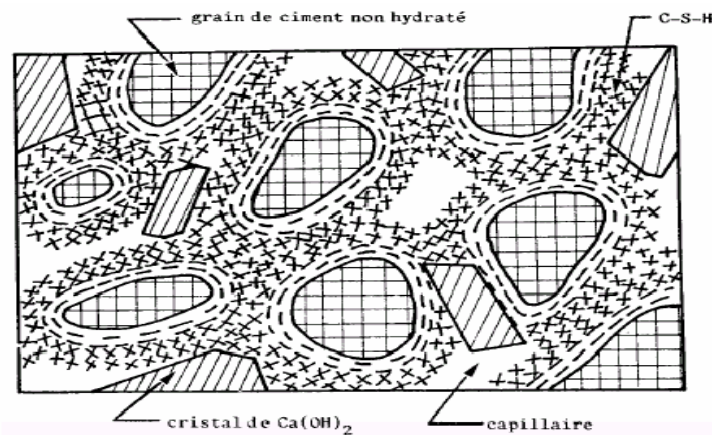
Lorsque le ciment est en contact avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés.

La pâte de ciment hydratée est le résultat de la réaction chimique entre l'eau et le ciment (la réaction d'hydratation). C'est un processus chimique complexe où les principaux composés du ciment réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps.

La pâte de ciment hydratée est formée par :

- Les hydrates (C-S-H,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , sulfoaluminates...).
- Des gains de ciment anhydres.
- Des espaces capillaires.
- Des bulles d'air.

La figure I.3 illustre une représentation schématique d'une pâte de ciment partiellement hydratée.



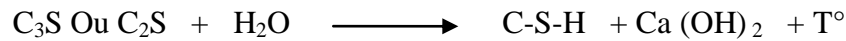
**Figure I. 3 : Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [4].**

Le clinker se dissout par attaque hydrolytique, c'est-à-dire par réaction avec les molécules d'eau. Les hydrates les plus importants sont les C-S-H, un composé non stœchiométrique. Il s'agit d'un gel qui influence la plupart des propriétés de la pâte. La réaction du  $\text{C}_3\text{A}$  avec l'eau dégage beaucoup de chaleur et elle doit être contrôlée par les sulfates, elle forme des sulfo-aluminates dont la forme la plus connue est l'ettringite ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ).

La réaction  $C_4AF$  dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance.

C'est surtout l'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_2S$  qui participent le plus au développement de la résistance en produisant des C-S-H.

Très sommairement, la réaction d'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_2S$  est la suivante :



L'hydratation des silicates de calcium anhydres  $C_3S$  et  $C_2S$  donne naissance à la portlandite  $Ca(OH)_2$  et au gel silicaté C-S-H, responsable de la cohésion du milieu. Le  $C_3S$ , presque totalement consommé à 28 jours, confère rapidement au ciment une résistance élevée. Le  $C_2S$ , qui s'hydrate dans un second temps, permet au contraire d'atteindre des résistances élevées à moyen et long termes.

L'aluminate tricalcique  $C_3A$  présente une réactivité importante dans l'eau ou dans une solution saturée par rapport à la portlandite. La précipitation des hydroaluminates de calcium qui en résulte induit une rapide perte d'ouvrabilité de la pâte de ciment. Pour éviter ce raidissement, du sulfate de calcium est introduit en petite quantité sous forme de gypse  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , de semi-hydrate  $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$  ou d'anhydrite  $CaSO_4$ . Dans ces conditions, la phase la moins soluble est l'ettringite ( $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ). Cette phase se forme tant que la concentration de sulfates en solution est suffisante. Lorsque tous les sulfates sont épuisés, ce sont les hydroaluminates de calcium comme  $C_4AH_{13}$  ou ses homologues monosubstitués (monosulfoaluminate de calcium, monocarboaluminate de calcium...) qui précipitent. L'alumino-ferrite tétracalcique  $C_4AF$ , constitué d'une solution solide de  $C_2A$  et  $C_2F$ , donne des hydrates analogues au  $C_3A$  par simple substitution  $Al^{3+} - Fe^{3+}$  lorsque l'hydratation est réalisée en présence d'hydroxyde de calcium.

Les produits d'hydratation des différentes phases de clinker sont récapitulés dans le Tableau I.5.

**Tableau I. 5 : Produits d'hydratation du clinker.**

Anhydres	Hydrates
$C_2S$ et $C_3S$	C-S-H et CH
$C_3A$	$C_3AH_6$ , $C_4AH_{16}$ <b>En présence de sulfate de calcium :</b> $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ettringite $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ monosulfoaluminate de calcium hydraté <b>En présence de <math>CaCO_3</math> :</b> $C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$ monocarboaluminate de calcium hydraté
$C_4AF$	$C_3(A,F)H_6$ , $C_4(A,F)H_{13}$ <b>En présence de sulfate de calcium :</b> $C_3(A,F) \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ $C_3(A,F) \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ <b>En présence de <math>CaCO_3</math> :</b> $C_3(A,F) \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O$

### c) Les hydrates

Les hydrates (la pâte de ciment durcie) jouent le rôle de colle qui solidarise les granulats entre eux pour former un matériau rigide. La pâte de ciment représente 25% à 40% du volume du béton. La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de la durabilité du béton, sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durcie.

Les hydrates comprennent [3]:

- Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ;
- Les aluminates hydratés ;
- La chaux hydratée ( portlandite) ;
- De l'eau adsorbée sur certains cristaux ;
- Des impuretés.

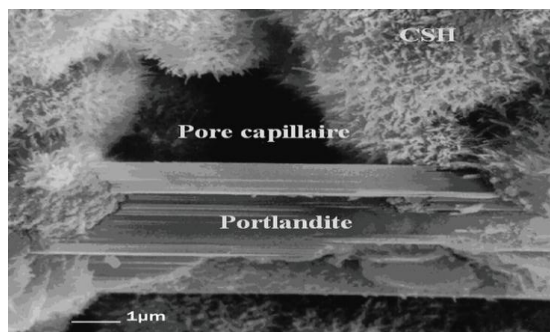
- Silicates de calcium hydratés C-S-H

Les C-S-H occupent entre 50% à 60% du volume solide d'une pâte de ciment complètement hydratée ; c'est un gel solide qui a les propriétés d'un corps solide. Il a une structure en feuillet, formée de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique des C-S-H est très élevée (100 à 700 m<sup>2</sup>/g). La cohésion des C-S-H est due, en partie, aux forces de Van der Waals entre les particules colloïdales des C-S-H.

Le pH de la solution interstitielle est très alcalin (voisin de 13). À des pH plus faibles, il peut y avoir lixiviation des ions Ca<sup>2+</sup> des C-S-H. Ceux-ci subissent alors des transformations qui peuvent augmenter leur porosité et diminuer les propriétés mécaniques.

Le gel de C-S-H est poreux. Les pores de gel, sont en fait les espaces qui contiennent de l'eau adsorbée sur les surfaces entre les feuillets. Ils sont très petits (2nm à 3nm) et la porosité du gel de C-S-H représente environ 28% du volume total du gel (Figure I.4).

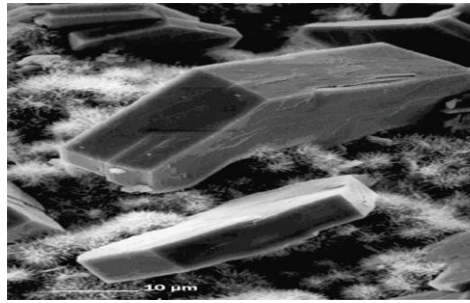
L'eau des pores de gel n'est pas "libre" car elle est fortement retenue sur les feuillets par des forces de surface. Les pores de gel étant extrêmement fins, ils contribuent très peu à la perméabilité de la pâte de ciment et du béton.



**Figure I. 4: Morphologie du C-S-H [5].**

- La chaux hydratée (CH ou Portlandite)

La portlandite (Ca(OH)<sub>2</sub> ou CH en notation cimentaire) est une phase présente sous une forme relativement pure, avec seulement de petites quantités d'ions étrangers. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique (la morphologie est très variable en fonction des paramètres de composition du béton). Elle est produite à la suite de l'hydratation du C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S. Dans la pâte de ciment hydratée, elle devient instable (lixiviation) lorsque le pH devient inférieur à environ 12,5. Elle participe peu au développement de la résistance du béton. Elle occupe de 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée (Figure I.5).



**Figure I. 5: image en microscopie électronique à balayage de cristaux de portlandite (courtoisie D. Damidot).**

- Les aluminates hydratés

Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydratée, on les retrouve généralement sous deux formes :

- Ettringite (trisulfoaluminates) aiguilles prismatiques.
- Monosulfoaluminates (plaquettes hexagonales).

## **I.5. Le laitier de haut-fourneau :**

### **I.5.1. Histoire du laitier de haut fourneau**

Vers 1818, « L. Vicat » avait déjà mentionné la possibilité d'utiliser du laitier en cimenterie. Mais il faut attendre 1862 pour que « Emil Langen » démontre qu'un mélange de laitier broyé et de chaux donnait naissance à un liant hydraulique. La fabrication industrielle du ciment de laitier commença en Allemagne en 1882, grâce à « G. Prussing » [6].

Actuellement, un très grand nombre de cimenteries fabriquent des liants hydrauliques contenant des teneurs variées en laitier (ciments normalisés ou ciments spéciaux).

### **I.5.2. Composition chimique du laitier de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau est un sous produit de l'élaboration de la fonte. Il est constitué de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de Coke. C'est un matériau minéral formé essentiellement de silicates et d'alumino-silicates de calcium. L'addition de laitier de haut fourneau au ciment présente un intérêt économique dans l'industrie du ciment et un intérêt technique dans le domaine de la construction.

Pour que le laitier de haut fourneau puisse être utilisé comme substituant au clinker, il doit être trempé, c'est-à-dire refroidi très rapidement, afin d'obtenir ses propriétés hydrauliques latentes liées à sa structure vitreuse découverte par Langen en 1862. Pour obtenir cet état vitreux, le laitier est granulé à la sortie du haut fourneau : il est pulvérisé en gouttelettes (de 3 à 5 mm) et trempé [7].

Le laitier granulé de haut fourneau se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50%, de silice entre 25 et 35%, de l'alumine entre 12 et 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités [8].

La composition chimique du laitier du haut fourneau varie largement suivant la nature du minéral, du métal à obtenir, du combustible utilisé et des conditions de refroidissement. Cette composition chimique est susceptible de se changer au cours des années selon le type du minéral, avec l'épuisement des sources.

Ces variations touchent directement les quatre majeurs constituants (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) puis les composés en petites quantités (souffre et MnO et FeO). En général, le contenu en CaO varie entre 30 et 50 %, le contenu en SiO<sub>2</sub> entre 28 et 38%, et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 8 à 24%, le MgO entre 1 à 18 %, le soufre (S) de 1 à 2,5 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MnO de 1 à 3 % [9].

Dans le procédé de fabrication, la majeure partie des oxydes de fer passe dans la fonte avec une quantité du combustible (coke) tandis que les autres éléments : (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) se combinent pour former le laitier de haut fourneau.

Le tableau I.6 présente la variation de la teneur des oxydes majeurs et mineurs dans le laitier suivant ses types [9].

**Tableau I. 6: Composition chimique de différents types de laitier de haut fourneau [6].**

Constituants	Laitier Français	Laitier Nord Américain	Laitier Algérien	
			1995	2000
SiO <sub>2</sub>	29 à 36	33 à 42	39.30	40.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13 à 19	10 à 16	8.20	6.00
CaO	40 à 43	36 à 45	39.40	42.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 4%	0.3 à 20	00.00	2.03
MgO	< 6%	3 à 12	6.00	4.68
S	< 1.5%	–	0.07	0.15
TiO <sub>2</sub>	–	–	2.35	2.64
MnO	–	–	–	1.07
K <sub>2</sub> O	–	–	–	1.16



La présence du laitier dans le mélange de mortier de ciment ou du béton permet d'avoir [10] :

- Un temps de prise plus long,
- Une faible chaleur d'hydratation,
- Une meilleure ouvrabilité,
- Une faible résistance au jeune âge et une bonne résistance à long terme.

### **I.5.3. Différents types de ciment de haut fourneau :**

Les ciments de haut fourneau ou CEM III sont constitués de laitier de haut fourneau et de clinker. Les proportions relatives de ces deux éléments permettent de définir 3 classes de CEM III :

- CEM III/A, 36 à 64% de laitier et 35 à 64% de clinker ;
- CEM III/B, 66 à 80% de laitier et 34 à 20% de clinker ;
- CEM III/C, 81 à 95% de laitier et 5 à 15 % de clinker.

Les ciments à forte teneur en laitier sont caractérisés par une vitesse d'hydratation réduite, une bonne résistance aux milieux agressifs mais une forte sensibilité à la dessiccation.

### **I.6. Caractéristiques de la microstructure de la pâte de ciment :**

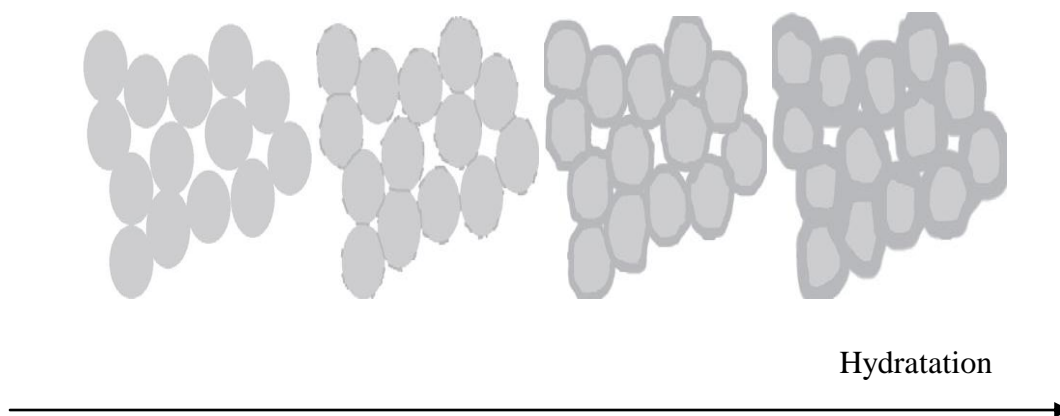
La microstructure de la pâte de ciment résulte du caractère granulaire du produit de départ. Dans le milieu ionique que constitue la solution interstitielle et dans les secondes qui suivent la fin du gâchage, des forces attractives maintiennent les grains de ciment encore anhydres en contact formant ainsi un solide poreux peu résistant [10]. Celui-ci va être renforcé au cours de l'hydratation par la formation des hydrates, d'abord près des points de contact entre les grains anhydres, puis tout autour des grains, comblant ainsi, au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit, l'espace laissé libre entre les grains et occupé initialement par l'eau, comme représenté dans la figure I.6.

La porosité capillaire est l'espace entre les grains, occupé initialement par l'eau. Deux caractéristiques de cette porosité capillaire sont particulièrement importantes :

- Son volume ;
- Sa connectivité.

Le volume de la porosité capillaire dépend de la formulation du matériau cimentaire :

- Le rapport eau/ciment (E/C); pour une quantité de ciment donnée, plus le volume d'eau est grand, plus l'espace initial entre les grains de ciment est grand et plus la porosité capillaire est grande.
- La distribution granulométrique du matériau cimentaire : la porosité capillaire diminue si des particules plus fines sont capables de combler au moins partiellement l'espace entre les plus gros grains.
- Le degré d'hydratation : le volume molaire des hydrates étant supérieur à celui des anhydres, l'espace occupé par le solide va augmenter au fur et à mesure de l'hydratation et la porosité capillaire diminuer.
- Le volume de la porosité capillaire est un paramètre déterminant la résistance de la pâte de ciment et donc du béton.



**Figure I. 6 : Représentation bidimensionnelle de l'empilement de grains de ciment dans la pâte [5].**

Les agents agressifs extérieurs peuvent pénétrer facilement dans le matériau, si l'ensemble de la porosité capillaire est interconnecté, ce qui va faciliter sa dégradation. La connectivité diminue au fur et à mesure de l'hydratation: les hydrates en se développant sont susceptibles de boucher les entrées des pores. L'origine de la porosité des hydrates est essentiellement de même nature que celle de la porosité capillaire : elle est due au caractère granulaire des produits d'hydratation. La plus grande partie de la matière hydratée de la pâte de ciment est constituée par les C-S-H. [11].

La connectivité du réseau capillaire est un paramètre particulièrement important pour la durabilité du matériau. [5].

### **I.7. Influence du rapport E/C sur l'hydratation des ciments :**

Le ciment doit être mélangé avec une quantité suffisante d'eau pour pouvoir s'hydrater complètement. Cette quantité, définie par le rapport Eau/Ciment (E/C), a une influence sur l'hydratation du ciment, les propriétés des matériaux hydratés et la rhéologie de la suspension.

Afin d'évaluer l'influence du rapport E/C sur l'hydratation du ciment et sur la nature de la structure des hydrates formés, plusieurs recherches ont été effectuées. Les résultats obtenus ont confirmé [12] :

- Le suivi des déformations endogènes lors de l'hydratation montre, pour les rapports E/C élevés, une phase de gonflement suivie d'un retrait. Dans le cas des rapports E/C faibles, seule la phase de retrait est observée ;
- L'ettringite est plus visible dans les pâtes de ciment gâchées avec un rapport E/C élevé ;
- L'épaisseur de l'auréole de C-S-H autour des grains de ciment anhydres croît avec le rapport E/C et l'âge de la pâte de ciment,
- Lorsque le rapport E/C augmente, la quantité de portlandite, ramenée à une masse unitaire de ciment anhydre, augmente alors que le rapport molaire  $\text{CaO/SiO}_2$  des C-S-H a tendance à diminuer ;
- Quelle que soit l'échéance d'hydratation, il apparaît un comportement différent lorsque le rapport E/C atteint des valeurs comprises entre 0,35 et 0,45. Cette limite

semble correspondre à un « seuil de percolation » de l'eau dans le réseau capillaire en cours de formation.

### **I.8. Conclusion :**

L'Eau et Le Ciment sont des ingrédients essentiels du béton; on pourrait même dire qu'ils sont les plus importants. En effet, une réaction dite d'hydratation dont les premières manifestations se développent aussitôt que le ciment Portland est mis en contact avec l'eau. Ceci est causé notamment par le fait que certains composés du ciment, le  $C_3A$  en particulier, sont très réactifs et que les ciments Portland actuels présentent de très fines particules de l'ordre de quelques micromètres qui sont évidemment très réactives.

Les lois qui gouvernent l'hydratation du ciment, c'est-à-dire l'évolution des phases anhydres au contact de l'eau en phases hydratées, gouvernent de la même manière l'évolution des phases hydratées si elles sont mises en contact avec un milieu dans lequel des phases moins solubles sont susceptibles d'exister selon les lois thermodynamiques.

La synthèse bibliographique sur les caractéristiques d'hydratation de la pâte de ciment étant réalisée, nous allons à présent nous intéresser aux propriétés des bétons à l'état frais, en l'occurrence, la rhéologie des bétons.

**Chapitre II : Propriétés des bétons à l'état frais**

---

### **II.1. Introduction :**

Le béton présente des caractéristiques assez complexes aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci, et est donc l'objet de nombreux traités de physique, chimie, mécanique, science de matériaux, rhéologie... Pour son utilisation, ce matériau doit satisfaire certaines exigences: avoir une ouvrabilité (fluidité) adaptée aux moyens de mise en œuvre disponibles, et atteindre les propriétés mécaniques et de durabilité visées.

En plus d'avoir un bon comportement mécanique à l'état durci, un matériau cimentaire considéré comme performant doit satisfaire une bonne maniabilité à l'état frais dont la mise en œuvre nécessite le minimum d'intervention humaine avec un minimum de perte d'homogénéité [16]. Ce comportement à l'état frais dépend de plusieurs facteurs : quantité d'eau comme paramètre dominant, composition du matériau cimentaire et condition d'hydratation.

La prise des liants hydrauliques et le durcissement du béton sont des phénomènes complexes. Ce chapitre a pour but de bien montrer la variation de consistance, du temps de prise ainsi que les différents paramètres qui peuvent influencer sur ces propriétés.

### **II.2. Ouvrabilité :**

Après le malaxage, le béton frais doit rapidement être mis en œuvre sur le chantier pour diverses opérations : vidange dans les coffrages, serrage (par vibration, piquage...) et talochage, ... La manière dont le matériau se comporte est gouvernée par son ouvrabilité. L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange.

L'Ouvrabilité (ou maniabilité) est l'un des facteurs qui gouvernent la formulation d'un matériau cimentaire. Celle-ci, à son tour, dépend principalement des propriétés rhéologiques de ces matériaux à l'état frais. L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton. Elle peut être définie comme la facilité offerte à sa mise en œuvre dans les ouvrages. Chaque liant demande une quantité d'eau différente, appelée quantité d'eau optimale, pour que la pâte soit d'une bonne ouvrabilité.

Dans le domaine des bétons frais, on a surtout étudié l'ouvrabilité (ou maniabilité). Selon la norme NFP 18-451, l'ouvrabilité d'un béton est la propriété déterminant l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité du béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité. Pour décrire cette propriété du béton frais, on utilise également souvent le terme consistance et cohésion, le premier est un indice de la mobilité (capacité de s'écouler) du béton frais, et le second est un indice de sa stabilité (capacité d'empêcher la ségrégation).

### II.3. Rhéologie du mortier et du béton frais :

#### II.3.1. Définition de la rhéologie

La rhéologie est par définition l'étude de l'écoulement des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées. C'est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées. La déformation et l'écoulement sont en fait les conséquences de mouvements relatifs des particules d'un corps les unes par rapport aux autres. Dans le cadre des matériaux fluides, on s'intéresse plus particulièrement à leur écoulement [14].

La rhéologie des mélanges cimentaires est un domaine relativement complexe à cause de leur constitution multi-composant : granulats, ciment, ajouts minéraux, eau, adjuvants. Ces matériaux, de nature différente en morphologie et granulométrie, présentent divers comportements rhéologiques sous forme de mélange. D'après [15], les gros granulats dans la composition d'un matériau cimentaire n'ont qu'un effet de masse, et le rôle le plus important dans la rhéologie de ces mélanges frais est joué par les éléments fins.

#### II.3.2. Equations générales

Généralement, en termes mécaniques, la grandeur cinématique correspondant à l'écoulement est le tenseur de gradient de vitesse  $\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}$ . En coordonnées cartésiennes, on suppose que la vitesse  $\vec{v}$  d'un élément représentatif se situant à (x,y,z) à l'instant t est la suivante :

$$\vec{v} = v_x \vec{e}_x + v_y \vec{e}_y + v_z \vec{e}_z \quad \text{Eq.II-1}$$

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}$  s'écrit :

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{xx} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yx} & \dot{\varepsilon}_{yy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zx} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zy} & \dot{\varepsilon}_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{Eq.II-2}$$

Une autre grandeur correspondant à la force appliquée à l'élément est le tenseur de contrainte  $\underline{\underline{\sigma}}$ , exprimé sous la forme suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{Eq.II-3}$$

Les équations d'équilibre s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z = \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{cases} \quad \text{Eq.II-4}$$

Où:

$$\vec{f} = f_x \vec{e}_x + f_y \vec{e}_y + f_z \vec{e}_z \quad \text{Eq.II-5}$$

$f$  est le vecteur de force volumique, et  $\rho$  est la masse volumique du matériau. Généralement, on connaît  $f$ . Il reste donc 10 inconnues dans l'équation (Eq.II-4) :  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$ ,  $\rho$ .



L'écriture de la conservation de la masse fournit une équation supplémentaire:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{Eq.II-6}$$

Pour résoudre le problème d'écoulement, il manque encore six équations. Ces dernières sont en fait fournies par la relation entre  $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$  et  $\underline{\underline{\sigma}}$ , autrement dit la loi de comportement du matériau. On peut l'exprimer sous la forme suivante:

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}) = 0 \quad \text{Eq.II-7}$$

On définit la viscosité absolue  $\mu_{\text{abs}}$  par le rapport de la contrainte de cisaillement, divisée par le gradient de vitesse. Les fluides peuvent avoir des comportements très différents. Une première catégorie de comportement regroupe les fluides qui s'écoulent à une vitesse proportionnelle à la contrainte de cisaillement appliquée, même si cette dernière est infinitésimale. Ces fluides sont dits exclusivement visqueux. Parmi ces fluides, les plus simples sont certainement ceux de Newton, caractérisés par une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et le gradient de vitesse  $\dot{\gamma}$  pour un écoulement unidimensionnel. Pour ces matériaux, la viscosité absolue est constante :

$$\tau = \mu_{\text{abs}} \dot{\gamma} \quad \text{Eq.II-8}$$

$\mu_{\text{abs}}$  est alors simplement appelée viscosité, et s'exprime en Pa.s.

Il existe une autre catégorie de fluides, pour lesquels une contrainte minimale est nécessaire afin de provoquer leur écoulement ; cette contrainte est appelée « seuil de cisaillement »  $\tau_o$  (en Pa). Les fluides de cette catégorie sont alors dits « viscoplastiques ». Parmi eux, les plus connus sont ceux de Bingham. La loi de comportement des fluides binghammiens s'écrit :

$$\tau = \tau_o + \mu \dot{\gamma} \quad \text{Eq.II-9}$$

où  $\mu$  est la viscosité plastique (en Pa.s).

Nous remarquons que les fluides newtoniens sont en fait un cas particulier des fluides binghamiens, pour lesquels le seuil de cisaillement  $\tau_0$  est nul. Lorsque  $\tau_0$  est non nul, la viscosité absolue est différente de la viscosité plastique, et varie avec le gradient de vitesse. Afin de modéliser des comportements qui ne sont ni linéaires ni affines, de type « rhéoépaississant » ou « rhéofluidifiant », un certain nombre de modèles plus ou moins compliqués peuvent être trouvés dans la littérature. Nous en présenterons quelques uns dans les prochains paragraphes.

Prenons les fluides newtoniens, i.e. le cas plus simple; l'équation (Eq.II-7) est concrétisée par les six équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \tau_{xy} = \mu \dot{\gamma}_{xy} \\ \tau_{xz} = \mu \dot{\gamma}_{xz} \\ \tau_{yz} = \mu \dot{\gamma}_{yz} \end{array} \right. \quad \text{Eq.II-10}$$

Où :

$$p = -\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad \text{Eq.II-11}$$

En reportant les équations (Eq.II-10) à (Eq.II-4), nous obtenons les équations de Navier-Stokes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x + \mu \nabla^2 v_x + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\text{div} \vec{v}) = \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y + \mu \nabla^2 v_y + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\text{div} \vec{v}) = \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z + \mu \nabla^2 v_z + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\text{div} \vec{v}) = \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{array} \right. \quad \text{Eq.II-12}$$

avec les opérateurs suivants :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$div = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{e}_z$$
Eq.II-13

Vue la complexité de l'équation (Eq.II-12), on doit toujours simplifier le problème dans les cas particuliers. Par exemple, considérer que le mouvement du fluide est en régime permanent si l'écoulement change peu avec le temps; prendre le fluide comme incompressible si son volume varie très peu en cours d'écoulement, négliger les efforts d'inertie (les termes des membres de droite du système) pour le mouvement d'une sphère, etc. Malgré tout, il y a en fait très peu de problème d'écoulement pour lesquels on puisse trouver des solutions analytiques [19].

### III.3.3. Modèles rhéologiques appliqués aux bétons et aux mortiers

Le comportement rhéologique des mortiers et des bétons est souvent assimilé à celui d'un fluide de Bingham ou de Herschell-Bulkley. Ces modèles permettent d'identifier deux paramètres rhéologiques : le seuil de mise en écoulement  $\tau_o$  et la viscosité  $\eta$ .

- Modèle de Legrand :

Pour estimer le seuil de cisaillement d'une pâte de ciment, Legrand a proposé :

$$\tau = a e^{b(\Phi-0.5)}$$
Eq.II-14

où :

$\Phi$  : Concentration en ciment

a,b : paramètres à ajuster, dépendant de la granulométrie et de la surface spécifique du ciment.

- Modèle de Hobbs :

Dans ce modèle, Hobbs considère le béton comme un matériau diphasique constitué d'une pâte de ciment et de granulats. L'auteur essaie de prédire les propriétés du béton en fonction de celles de la pâte de ciment. Les lois de comportement de la pâte et du béton sont écrites :

$$\tau_p = \tau_{0p} + \eta_p \dot{\gamma}_p$$
Eq.II-15

$$\tau_b = \tau_{0b} + \eta_b \dot{\gamma}_b$$
Eq.II-16

où

$p, b$  : indices associés respectivement à la pâte et au béton.

La contrainte moyenne et le seuil pour un volume élémentaire représentatif du béton s'écrivent :

$$\tau_b = (1 - \Phi_g)\tau_p + \Phi_g\tau_g \quad \text{Eq.II-17}$$

$$\tau_{0b} = (1 - \Phi_g)\tau_{0p} + \Phi_g\tau_{0g} \quad \text{Eq.II-18}$$

où :

$\tau_g$  : contrainte exercée sur le granulat

$\tau_{0g}$  : contribution du granulat au seuil de cisaillement du béton.

$\Phi_g$  : concentration volumique du granulat.

En considérant que seule la pâte est déformable (les granulats sont rigides), le gradient de vitesse moyenne de déformation dans un volume élémentaire représentatif peut être écrit sous forme :

$$\dot{\gamma}_b = \dot{\gamma}_p(1 - \Phi_g) \quad \text{Eq.II-19}$$

Les deux hypothèses suivantes ont été émises :

$$\tau_{0g} = k\tau_{0p} \quad \text{Eq.II-20}$$

$$\tau_g = k\tau_p \quad \text{Eq.II-21}$$

$k$  est une constante dépendant de la concentration des granulats, déterminée par l'expérience.

L'auteur aboutit à la relation suivante :

$$k = \frac{2.5\Phi_{max}}{\Phi_{max} - \Phi_g} \quad \text{Eq.II-22}$$

$\Phi_{max}$  : concentration volumique maximale des grains.

Les équations précédentes conduisent finalement aux formules :

$$\tau_{0b} = \tau_{0p} \left( 1 + \frac{1.5\Phi_{max}\Phi_g + \Phi_g^2}{\Phi_{max} - \Phi_g} \right) \quad \text{Eq.II-23}$$

$$\eta_b = \eta_p \left( 1 + \frac{2.5\Phi_{max}\Phi_g + \Phi_g^2}{(1 - \Phi_g) - (\Phi_{max} - \Phi_g)} \right) \quad \text{Eq.II-24}$$

Ce modèle a été validé pour certains bétons (fermes) mais il n'est pas universel.

- Modèle de Kikukawa – Murata

Dans ce modèle, les auteurs considèrent qu'un mélange est constitué de deux phases : solvant et soluté.

- Pour la pâte de ciment, l'eau est le solvant, le ciment est le soluté;
- Pour le mortier, la pâte est le solvant, le sable est le soluté;
- Pour le béton, le mortier est le solvant, le gravier est le soluté.
- Pour estimer la viscosité du mélange, ces auteurs ont proposé l'équation suivante :

$$\eta = \eta_f \left(1 - \frac{\Phi_s}{\Phi}\right)^{-k} \quad \text{Eq.II-25}$$

où :

$\Phi_s$  : concentration volumique du soluté.

$\Phi$  : concentration volumique maximale du soluté.

$k$  : constante liée aux formes des solutés.

Pour les pâtes de ciment courantes, les auteurs ont trouvé que la constante  $k$  est approximativement une fonction affine de la concentration volumique en soluté :

$$k = -15.6\Phi_s + 11.2 \quad \text{Eq.II-26}$$

Pour les mortiers, la constante  $k$  dépend du module de finesse du sable :

$$k = -0.57 F + 3.04 \quad \text{Eq.II-27}$$

Pour les bétons, la constante  $k$  dépend du module de finesse du gravier :

$$k = -0.89 F + 9.31 \quad \text{Eq.II-28}$$

L'intérêt de ce modèle est sa simplicité. Il tient compte également de l'influence des propriétés géométriques des matériaux, ce qui lui donne plus de sens physique et permet d'espérer plus de précision.

- Modèle de viscosité multi-échelle - modèle Faris adapté

Afin d'estimer la viscosité des suspensions polydisperses de sphères multimodales dans un liquide newtonien, Farris a développé une théorie [20]. L'idée est de considérer que les petites sphères se comportent comme un liquide devant les grosses sphères si le rapport de leurs rayons est suffisamment faible. Ceci permet de découper une suspension multimodale et de calculer une par une des suspensions unimodales découplées. Selon les résultats expérimentaux, on constate que la viscosité d'une suspension de sphères unimodales ne dépend que de la viscosité  $\eta_f$  du fluide saturant et de la concentration volumique solide  $\Phi$ :

$$\eta = \eta_f H(\Phi) \quad \text{Eq.II-29}$$

où :

H est une fonction croissante de  $\Phi$ .

Dans une suspension de sphères bimodales dont les tailles des deux classes sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, avec l'hypothèse évoquée (les petites sphères se comportent comme un liquide devant les grosses), on peut calculer la viscosité de la suspension par l'équation suivante :

$$\eta = \eta_1 H(\Phi_2) = \eta_f H(\Phi_1) H(\Phi_2) \quad \text{Eq.II-30}$$

$\Phi_1$ : Concentration volumique solide de la suspension 1 découpée : fluides saturants + petites sphères.

$\Phi_2$ : Concentration volumique solide de la suspension 2 découpée : suspension 1 + grosses sphères.

$$\Phi_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_f} \quad \text{Eq.II-31}$$

$$\Phi_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2 + V_f} \quad \text{Eq.II-32}$$

$V_1, V_2, V_f$  : étant les volumes de fluide saturant, de petites sphères et de grosses sphères dans la suspension.

En généralisant, cette considération à une suspension de sphères multimodales de n classes, on peut obtenir l'équation suivante pour estimer la viscosité de cette suspension :

$$\eta = \eta_f \prod_{i=1}^n H(\Phi) \quad \text{Eq.II-33}$$

Avec la définition de concentration volumique de solide  $\Phi_i$  de chaque suspension découpée :

$$\Phi_i = \frac{V_i}{V_f + \sum_{j=1}^n V_j} \quad \text{Eq.II-34}$$

$V_j$ : le volume de fluide saturant.

$V_i$ : le volume de constituant i.

Enfin, Farris a donné les fonctions H selon la concentration volumique de solide  $\Phi$ :

- Pour les suspensions de faible concentration :

$$H(\Phi_i) = (1 - \Phi_i)^{-k} \quad \text{Eq.II-35}$$

k étant une constante positive.

Lorsque  $\Phi < 0,2$ ,  $k = 2,5$  pour les suspensions de concentration.

- Pour les concentrations élevées :

$$H(\Phi_i) = \left(1 - \frac{\Phi_i}{\alpha}\right)^{-k\alpha} \quad \text{Eq.II-36}$$

Dans le cas du béton, les tailles des constituants de la phase solide s'étendent de quelques nanomètres à quelques centimètres. Donc, l'hypothèse de la différence des tailles de chaque classe ne peut pas être satisfaite. Néanmoins, l'auteur a concentré les tailles des principaux constituants (granulat, ciment et particule fine de silice) chacun à leur valeur moyenne. Le béton fluide est donc considéré comme une suspension bimodale (sans particule fine de silice) ou trimodale (avec particule fine de silice).

L'équation pour estimer la viscosité du béton peut être écrite sous la forme suivante :

$$\eta = \eta_f \left(1 - \frac{\Phi_p}{\alpha_p}\right)^{-k\alpha_p} \left(1 - \frac{\Phi_c}{\alpha_c}\right)^{-k\alpha_c} \left(1 - \frac{\Phi_g}{\alpha_g}\right)^{-k\alpha_g} \quad \text{Eq.II-37}$$

$\Phi_p$ ,  $\Phi_c$ ,  $\Phi_g$  représentent les concentrations volumiques solides découplées des classes des particules fines de silice, de ciment et de granulat.

$\alpha_p$ ,  $\alpha_c$ ,  $\alpha_g$ , représentent les concentrations volumiques d'empilement maximum des particules fines de silice, de ciment et de granulat.

Étant donné que le dosage des particules fines de silice est toujours suffisamment faible pour que sa concentration volumique (dans la suspension découplée) ne dépasse pas 0.2, on garde  $k = 2,5$  pour des particules fines de silice. L'équation devient :

$$\eta = \eta_f \left(1 - \frac{\Phi_p}{\alpha_p}\right)^{-2.5\alpha_p} \left(1 - \frac{\Phi_c}{\alpha_c}\right)^{-k\alpha_c} \left(1 - \frac{\Phi_g}{\alpha_g}\right)^{-k\alpha_g} \quad \text{Eq.II-38}$$

Pour estimer la concentration volumique maximale des différentes classes, on peut utiliser le modèle de porosité de Caquot:

$$\alpha = 1 - 0.45 \left( \frac{d}{D} \right)^{0.19} \quad \text{Eq.II-39}$$

où :

d et D représentent les tailles de tamis correspondant respectivement à 10% et 90% de passant.

Plus récemment, Sedran et De Larrard ont développé le logiciel René-LCPC pour estimer de façon plus précise la concentration volumique maximale d'un mélange. En plus, le LCPC a trouvé que dans le modèle de Faris on ne tient pas compte de l'effet de l'adjuvant. La fonction empirique ajustée est :

$$\eta_r = h(V_s) = \left( 1 + K_s \frac{V_s}{\beta_s} \right) \quad \text{Eq.II-40}$$

où :

$\eta_r$ : viscosité relative de la pâte adjuvantée par rapport à celle de la pâte sans superplastifiant.

$V_s$  : dosage en superplastifiant.

$\beta_s$ : dosage de saturation (au sens chimique) en superplastifiant.

$K_s$ : paramètre à ajuster.

En fin, le modèle de Faris adapté aux bétons fluides à hautes performances adjuvantés s'écrit :

$$\eta = \eta_f \left( 1 + k_s \frac{V_s}{\beta_s} \right) \left( 1 - \frac{\Phi_p}{\alpha_p} \right)^{-k\alpha_p} \left( 1 - \frac{\Phi_c}{\alpha_c} \right)^{-k\alpha_c} \left( 1 - \frac{\Phi_g}{\alpha_g} \right)^{-k\alpha_g} \quad \text{Eq.II-41}$$

En conclusion, beaucoup de chercheurs ont essayé de lier la structure des suspensions et leurs propriétés pour maîtriser leur comportement rhéologique.

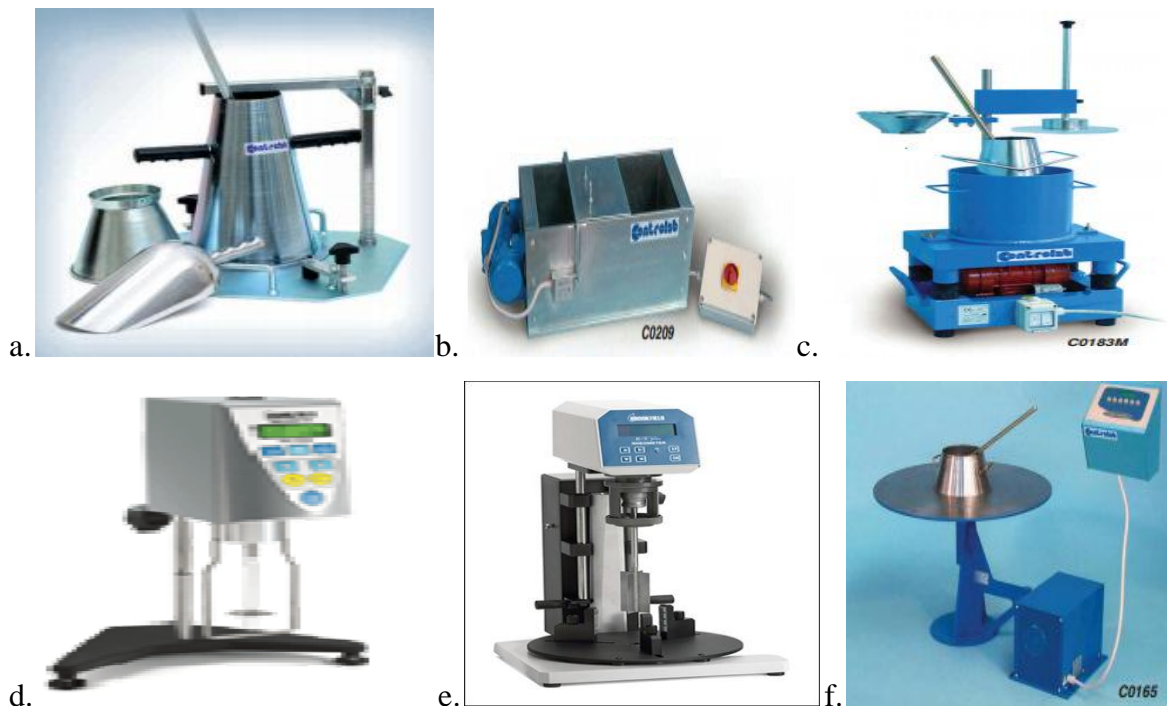
Pour des fluides concentrés, comme le béton frais, le comportement n'est pas Newtonien et la contrainte de cisaillement n'est plus linéairement proportionnelle au taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$ .



### III.3.4. Dispositifs expérimentaux

L'essai rhéologique est toujours indispensable pour réaliser un ouvrage. Lors de la réalisation d'un béton en laboratoire, il permet de prédire l'ouvrabilité d'un béton sur chantier. Au moment de la confection de l'ouvrage, il sert au contrôle-qualité, ce qui permet de prendre des mesures nécessaires avant la mise en place du béton. L'essai permet donc d'éviter ou de limiter au minimum la perte économique.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de rhéologie du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement. Les plus connus au niveau international sont : le « Cône d'ABRAMS », le « Consistomètre Vebe », le « Maniabilimètre L.C.L », la « Table à secousses », le « Viscosimètre à cylindres coaxiaux » et les « Rhéomètres » (figure II.1).



**Figure II. 1: Quelques dispositifs pour étudier la rhéologie des matériaux cimentaires**

- (a) Cône d'ABRAMS (image Controlab), (b) Maniabilimètre L.C.L (image Controlab), (c) Consistomètre VEBE (image Controlab), (d) Viscosimètre à cylindre coaxiaux (image Controlab), (e) Rhéomètre (image Brookfield), (f) Table à secousse (image Controlab).

L'affaissement au cône d'Abrams est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés. Il est décrit dans la norme européenne EN 12350-2. Pour effectuer cet essai, on remplit tout d'abord un moule en tôle tronconique ( $D = 20$  cm,  $d = 10$  cm,  $h = 30$  cm) de béton. Le remplissage est exécuté en trois couches serrées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide. La norme EN 206-1 spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (tableau II.1).

**Tableau II. 1: Classes d'affaissement selon la norme NF-EN 206-1**

Classes	Affaissement en mm
S1	De 10 à 40
S2	De 50 à 90
S3	De 100 à 150
S4	De 160 à 210
S5	> 220

Comme il a été dit précédemment, cet essai se pratique sur du béton. Cependant il existe un nouvel outil d'aide à la formulation du béton : La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) [16]. Cette méthode permet de concevoir, à partir d'une composition de béton, un mortier dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton.

Les dimensions du mini-cône sont bien évidemment réduites, comme le montre le tableau II.2.

**Tableau II. 2 : Dimensions du cône d'Abrams et du mini-cône.**

Dimensions en cm	Cône d'Abrams	Mini-cône
Hauteur	30	15
Diamètre de la base	20	10
Diamètre du haut	10	5

La classe d'affaissement du mortier est définie comme pour le béton, en prenant bien compte de la réduction homothétique des dimensions du cône et donc de l'affaissement. Le tableau II.3 donne les classes d'affaissement suivant la méthode MBE.

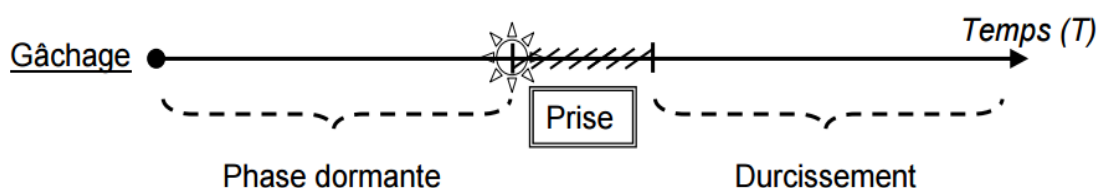
**Tableau II. 3 : Classes d'affaissements du béton et du mortier.**

Classes	Affaissement du béton en mm	Affaissement du mortier en mm
S1	De 10 à 40	De 5 à 20
S2	De 50 à 90	De 25 à 45
S3	De 100 à 150	De 50 à 75
S4	De 160 à 210	De 80 à 105
S5	> 220	> 110

### III.4. Le temps de prise :

L'association ciment-eau génère des réactions extrêmement complexes. Les silicates et aluminates qui se développent dans la phase d'hydratation, forment un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise". Le développement et la multiplication de ces microcristaux au cours de la phase de "durcissement", qui peut durer plusieurs mois, expliquent l'augmentation des résistances mécaniques et font du ciment une véritable "roche composite". Avant d'atteindre son stade final et durant son hydratation, la pâte de ciment passe par trois phases successives (figure II.2).

- La phase dormante: la pâte reste en apparence inchangée malgré le démarrage des premières réactions.
- Le début et la fin de prise: après une à deux heures, pour la plupart des ciments, une augmentation brusque de la viscosité se produit, accompagnée d'un dégagement de chaleur, c'est le début de prise. La fin de prise est effective lorsque la pâte cesse d'être déformable et devient un matériau rigide.
- Le durcissement: l'hydratation du ciment se poursuit et la résistance mécanique continue à croître durant plusieurs mois. La résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle de contrôle.



**Figure II. 2 : Les trois phases d'hydratation de la pâte de ciment (source : Wikipédia.com).**

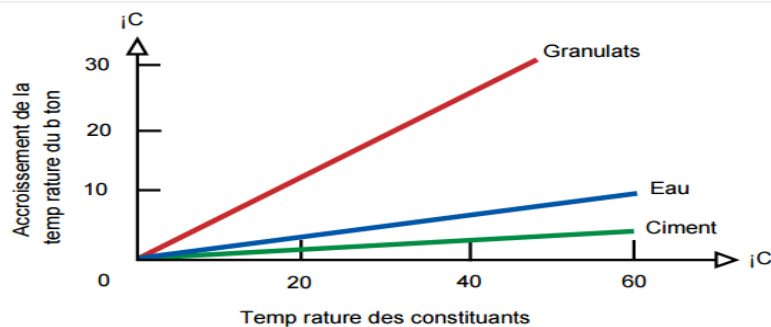
Le temps de prise d'une suspension dépend de plusieurs paramètres : composition chimique, finesse des composants etc. Les récentes recherches montrent que les adjuvants modifient de manières différentes la prise des suspensions cimentaires.

### III.5. Influence de la température sur les propriétés des bétons à l'état frais :

Le béton est sensible aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur:

- La rhéologie du béton et son évolution;
- La vitesse de prise;
- La cinétique de durcissement;
- L'évaporation et la dessiccation du béton.

L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en fonction de son dosage et de sa chaleur massique (figure II.3) [17].



**Figure II. 3 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants [21].**

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées.

- La rhéologie :

Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams évolue.

Pour une élévation de la température du béton, il y a une importante perte de l'ouvrabilité qui, en outre, peut se manifester très rapidement après la préparation du béton.

La solution de rajouter de l'eau pour pallier cette perte d'ouvrabilité est interdite car elle entraîne une baisse de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les échéances [17].

- Le temps de prise :

L'augmentation de la température accélère les réactions chimiques ; la prise du béton est plus rapide.

### **III.6. Conclusion :**

La propriété essentielle du béton frais est la maniabilité qui caractérise son aptitude à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur la maniabilité : la nature et le dosage en ciment, la forme des granulats, la granulométrie, l'emploi d'adjuvants et, bien entendu, le dosage en eau.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences de maniabilité et d'hydratation du ciment. Aujourd'hui, une gamme d'adjuvants plastifiants, plastifiants réducteurs d'eau, fluidifiants permettent d'obtenir la plasticité souhaitée pour le béton tout en limitant le dosage en eau.

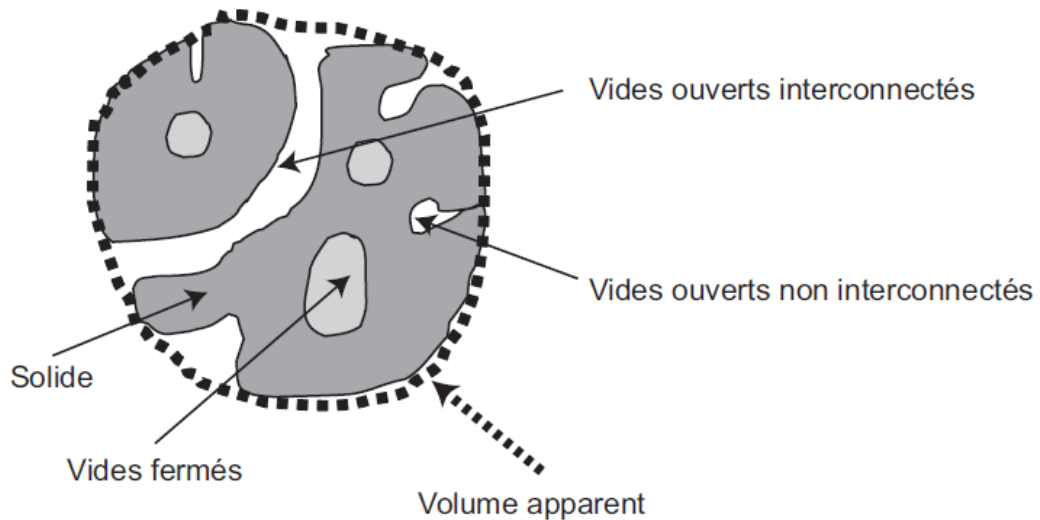
Le prochain chapitre est consacré à une étude théorique qui se rapporte au transport d'humidité dans les matériaux poreux de génie civil et la déformabilité du béton.

**Chapitre III : Structure poreuse des bétons et les propriétés de transferts**

---

### III.1. Introduction :

La structure poreuse des bétons est constituée de pores capillaires et de pores d'hydrates. Les pores capillaires, les plus gros, influencent fortement les propriétés de transfert des bétons surtout lorsqu'ils sont interconnectés. Schématiquement, le béton, matériau poreux, peut être représenté selon la figure III.1.



**Figure III. 1: Description schématique d'un matériau poreux [18]**

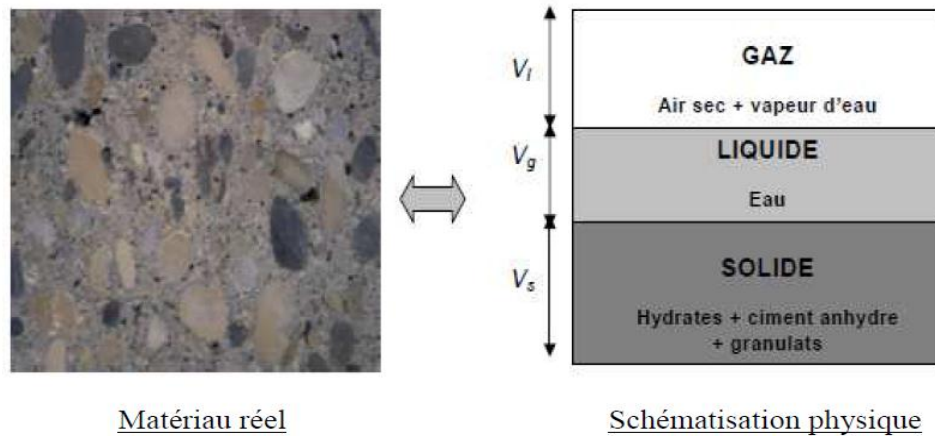
Le transport de matière à travers le réseau poreux des bétons dépend de l'état d'humidité du matériau. Par exemple les espèces ioniques ne peuvent diffuser dans le béton que par le liquide interstitiel contenu dans les pores alors que le dioxyde de carbone diffuse beaucoup plus vite dans l'air que dans l'eau.

Dans certaines dégradations, le transport de matière reste en grande partie interne au béton (cas de gel-dégel par exemple) : même dans ce cas, les dégradations susceptibles d'affecter le béton sont surtout dépendantes des possibilités de transfert interne. En effet une bonne durabilité aux cycles de gel-dégel est assurée par la réalisation d'un réseau de bulles d'air approprié.

## III.2. Définitions et caractérisation de la structure poreuse des bétons :

### III.2.1. Description physique d'un matériau poreux

D'un point de vue général, un matériau poreux de type béton ou roche, à l'état "naturel", est un milieu hétérogène polyphasique constitué d'une phase solide et de deux phases fluides en équilibre thermodynamique: une phase liquide (eau) et une phase gazeuse (air + vapeur d'eau) assimilée à un gaz parfait (Figure IV.2).



**Figure III. 2: Schématisation macroscopique d'un matériau poreux dans un état hydrique quelconque (source : Wikipédia.com)**

Pour décrire un solide poreux, on définit les grandeurs suivantes :

$V_g$ ,  $V_l$ ,  $V_s$  sont respectivement le volume de la phase gazeuse, liquide et solide ( $m^3$ ) ;

$V_v = V_g + V_l$ : volume des vides ( $m^3$ ).

### III.2.2. Classification des pores :

Plusieurs chercheurs rapportent différentes classifications de la structure poreuse du béton et de l'eau qu'elle contient (Mehta, 1986; Baroghel-Bouny, 1994; Marchand et Pigeon, 1996; Maltais et coll, 1997; Mindess et coll, 2003; Maltais, 2006; Delmas, 2006).

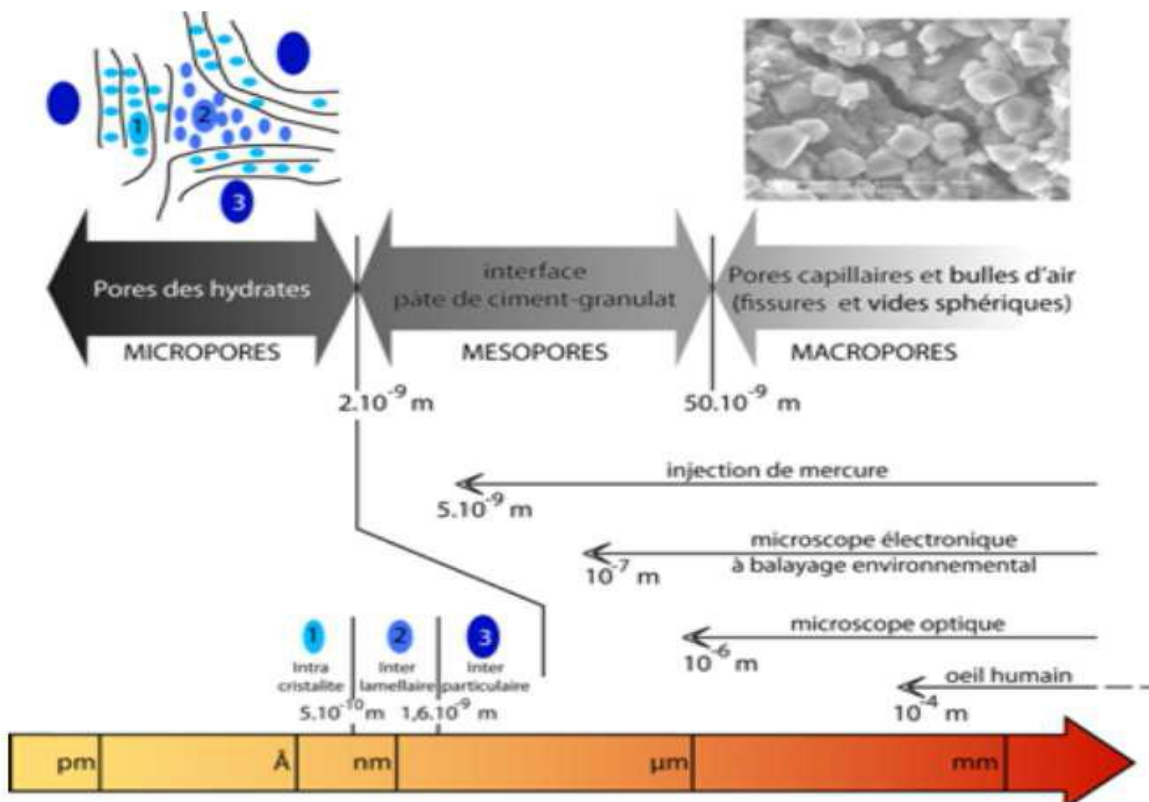
Le tableau IV.1 présente ces caractéristiques en fonction de la classification proposée par l'union internationale de la chimie pure et appliquée. Cette classification est basée sur le diamètre des pores [19].



**Tableau III. 1: Classification des pores.**

Identification	Diamètre moyen	Caractéristique du pore	Etat de l'eau
Micropores	< 2nm	Font partie intégrante des C-S-H	Eau très fortement absorbée
Mésopores	2 nm à 50 nm	Pores capillaires	Eau soumise à des tensions de surfaces
Macropores	50 nm à 10 $\mu\text{m}$	Pores capillaires	Eau libre
Bulles d'air	> 10 $\mu\text{m}$	--	Eau libre

La figure IV.3 présente les différentes gammes de pores dans un mortier et les différentes techniques de mesures utilisées dans le but de caractériser le réseau poreux [7].

**Figure III. 3 : Échelle des différentes gammes de pores dans un mortier [7].**

La structure poreuse de la pâte de ciment hydratée et du béton durci peut être caractérisée par deux paramètres accessibles à la mesure. Il s'agit de la porosité (porosité volumique totale, rayon de pore et la distribution de la taille des pores) et de la surface spécifique.

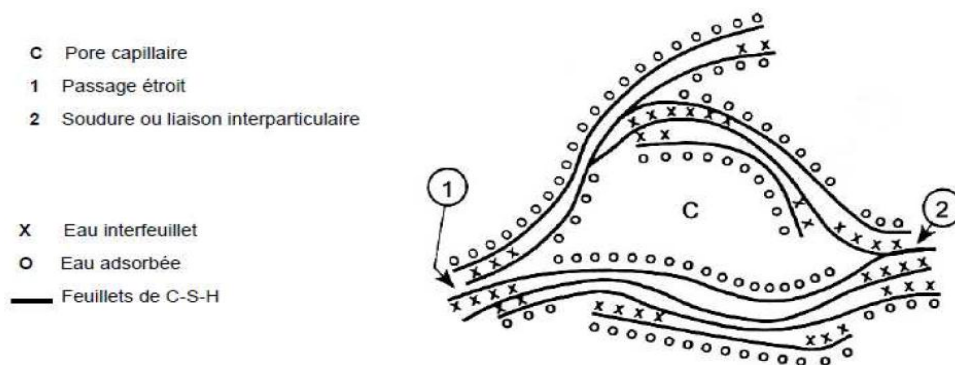
#### a) Micropores

La première porosité, dite porosité nanométrique, est due à la porosité intrinsèque de certains hydrates et en particulier les C-S-H qui ont une structure lamellaire, les gels de C-S-H sont représentés par une structure en feuillets.

Trois types de porosité leur sont associés (Figure III.3 et Figure III.4) :

- Les pores intra cristallites (espaces inter-feuillets) situés à l'intérieur des particules de gel C-S-H ( $r < 0,6$  nm);
- Les pores inter cristallites (espaces inter lamellaires) situés entre les lamelles de gel C-S-H ( $0,6 < r < 1,6$  nm);
- Les pores inter-particulaires ( $1,6 < r < 2$  nm).

L'ordre de grandeur de ces pores est de 0,1 à 2 nm. A cette échelle, les effets surfaciques tels la pression capillaire ou l'absorption dans les pores sont prépondérants devant les phénomènes de transport tels que le transport diffusif.

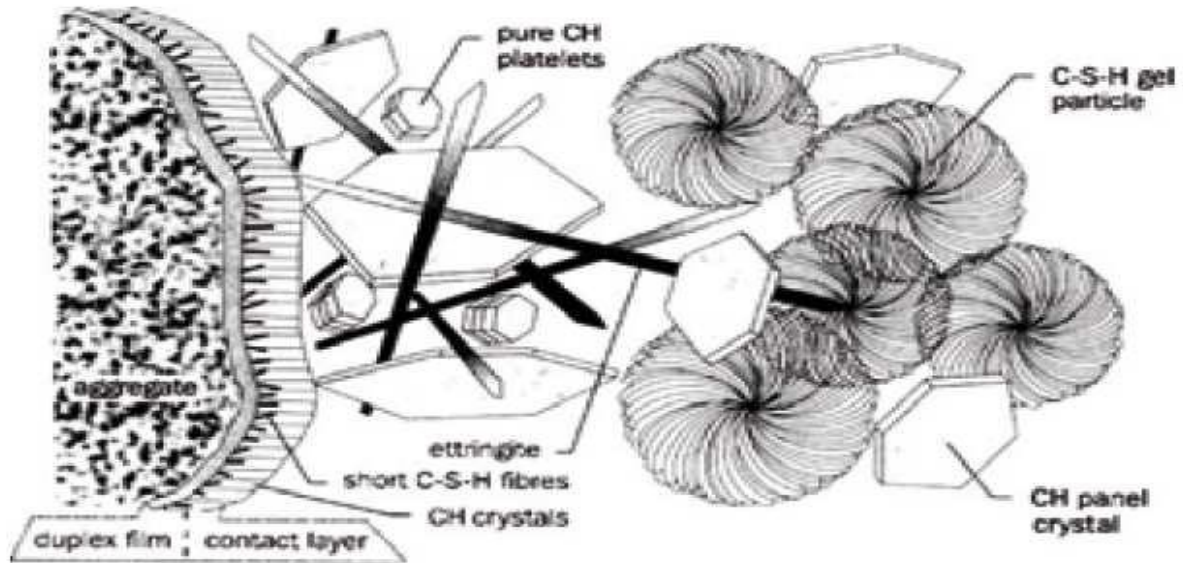


**Figure III. 4 : Modèle de Feldman et Sereda, revu par Sierra 1982 [19].**

#### b) Mésopores

Ils constituent principalement les pores inter-granulaires. Alors que les fissures forment des capillaires intrinsèques à la pâte de ciment observée déshydratée, des caractéristiques particulières ont été observées dès 1956 par Farran dans la zone située près de l'interface entre les granulats et la pâte de ciment. La microstructure et les propriétés du matériau sont différentes de celles du reste de la pâte (Figure IV.5). On appelle cette zone qui s'étend sur 50 nm environ la zone de transition interfaciale. Chaque fois qu'un agrégat est

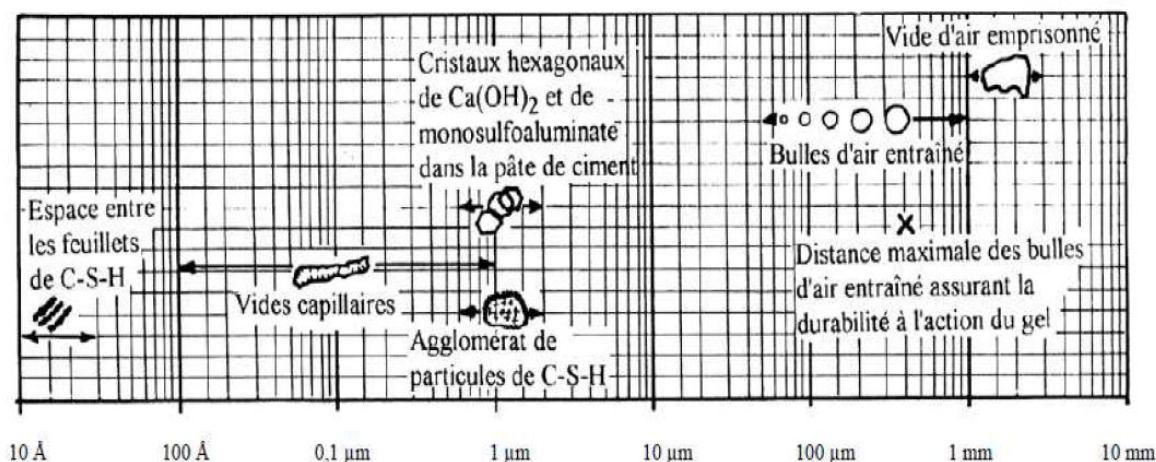
incorporé dans une pâte de ciment, une zone de transition interfaciale est formée. Au voisinage de l'agrégat, un film duplex de 1 à 2  $\mu\text{m}$  d'épaisseur est généralement observé [7].



**Figure III. 5: Schéma de la zone de transition interfaciale [7].**

### c) Macropores

La porosité capillaire a une taille entre 50 nm à 10  $\mu\text{m}$ . Cette porosité représente la partie de volume brut qui n'a pas été complètement remplie par les produits d'hydratation (espace résiduel entre des grains de ciment). Ce volume des pores capillaires dépend fortement du rapport E/C, puisque plus ce rapport est élevé, plus les grains de ciment sont initialement écartés et l'espace à combler par les hydrates est important. La plupart des phénomènes de transport se produisent au sein de cette porosité, ou que l'échange d'espèces par diffusion avec l'environnement extérieur se fait. Cette porosité peut être partiellement ou totalement connectée. La représentation schématique suivante (Figure IV.6) permet de visualiser le type de répartition porométrique susceptible d'exister au sein d'une pâte de ciment durcie [13].

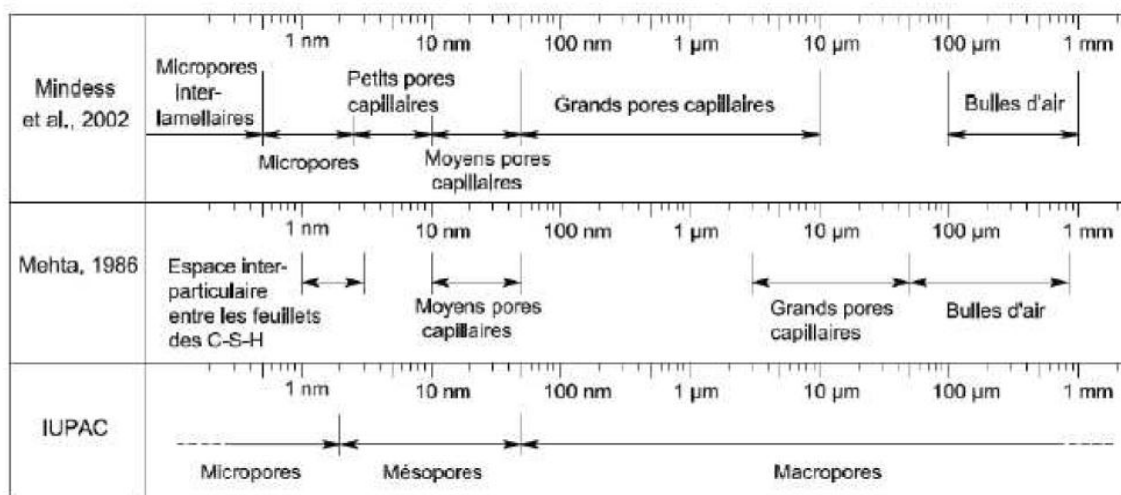


**Figure III. 6: Schéma de différentes formes de porosité dans la pâte de ciment durcie [13].**

d) Les bulles d'air

Pour la description de l'espace poral du béton, il convient d'ajouter les pores vides qui sont dus aux inclusions d'air occlus créés pendant le malaxage ou l'air entraîné par les adjuvants (entraîneur d'air). Ils sont détectables par microscopie optique, et parfois à l'oeil nu. Les pores vides ont une dimension moyenne de 100 µm mais peuvent être plus larges (jusqu'à quelques mm). La combinaison des pores vides avec les fissures peut rendre le matériau plus vulnérable aux attaques chimiques de l'environnement et à la diffusion des gaz (comme le CO2 notamment).

La figure IV.7 représente la classification des pores selon différents chercheurs [20].



**Figure III. 7: Classification des pores selon différents auteurs [20].**

### III.3. Les matériaux poreux, paramètres descriptifs de leur structure :

Une des phases continues constitue la matrice solide supposée indéformable ; cette phase définit les frontières d'un certain nombre d'espaces vides appelés pores, cavités, fissures, etc. espaces qui forment un réseau plus ou moins bien interconnecté.

La microstructure des matériaux poreux peut être décrite en utilisant certains paramètres qui sont la porosité, la connectivité, la tortuosité et la résistivité électrique.

#### III.3.1. La porosité

La porosité est la fraction de volume total occupée par les vides [21]. Avec  $V_t$  le volume total ou apparent de l'échantillon,  $V_v$  le volume des vides ou volume poreux et  $V_s$  le volume réel de la matrice solide, la porosité  $\varepsilon$  est donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon (\%) = \frac{V_v}{V_t} * 100 \quad \text{Eq. III-1}$$

avec :

$$V_t = V_v + V_s \quad \text{Eq. III-2}$$

La porosité du béton et de la pâte de ciment hydraté gouverne de nombreuses propriétés du béton dont :

- Presque toutes les caractéristiques mécaniques ;
- Toutes les perméabilités (eau, ions, gaz) ;
- Durabilité.

La porosité d'un matériau poreux peut être composée de deux types de vide définis en fonction de leur position par rapport au milieu extérieur (Tableau III.2 et Figure III.1). On distingue :

- Les vides ouverts ; ils communiquent avec l'extérieur ;
- Les vides fermés ; ils sont isolés, non accessibles, ne communiquent pas de manière directe ou indirecte avec l'extérieur.

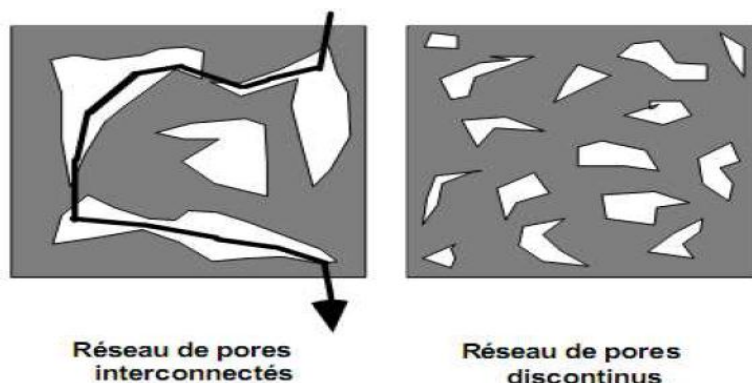
**Tableau III. 2: Définition des différents types de porosité d'un matériau.**

Porosité	Définition
Totale	Ensemble des vides fermés et ouverts.
Résiduelle	Ensemble des vides fermés.
Accessible	Partie de la porosité accessible où les fluides peuvent librement circuler.
Piégée	Partie de la porosité accessible ne permettant pas la récupération des fluides.
Primaire	Ensemble des vides présents dès la mise en place du matériau (air occlus).
secondaire	Ensemble des vides formé après la mise en place du matériau.

Les vides fermés n'interviennent pas dans les propriétés de transfert ; nous ne nous intéresserons dans cette étude qu'aux vides ouverts. La porosité primaire se forme au moment de la mise en place de la pâte, ce sont des vides quasi-sphériques dus à l'air occlus, c'est-à-dire l'air entrant dans la pâte au moment du malaxage. La porosité secondaire se forme lors de la déshydratation du matériau, avec l'évaporation de l'eau interstitielle et l'apparition de fissures [22].

### III.3.2. La connectivité

La connectivité est un paramètre topologique qui mesure le degré d'interconnexion d'un milieu poreux. En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possible car le degré d'interconnexion y est plus faible [23]. Pour un E/C plus faible, la porosité capillaire est en fait constituée d'un réseau de pores plus fin et plus discontinu [24]. La perméabilité de la pâte s'en trouve alors considérablement diminuée car il y a moins de chemins préférentiels pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs (Figure III.8).

**Figure III. 8: Influence du degré d'inter-connectivité sur la perméabilité de la pâte [4].**

Remarquons qu'un pore isolé, mais qui se connecte par exemple par microfissuration aux pores interconnectés, peut désormais participer aux écoulements à travers le matériau. On a alors une connectivité qui augmente par fissuration.

### III.3.3. La tortuosité

La tortuosité exprime le rapport moyen entre la longueur d'un échantillon parcourue par un fluide et la longueur effectivement parcourue par le fluide au travers de l'échantillon. La tortuosité est l'un des paramètres important de transfert de fluide, elle est définie par la relation [25]:

$$\tau = \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \quad \text{Eq.III-3}$$

Dans laquelle L est la longueur moyenne des lignes traversant l'échantillon et  $L_e$  la longueur de l'échantillon. Une estimation expérimentale de ce paramètre peut être obtenue en utilisant diverses méthodes comme la porosimétrie au mercure, l'analyse d'image, la diffusion de gaz et d'ions, l'imbibition capillaire ou les ondes acoustiques.

Un matériau poreux constitué d'un réseau de pores fortement tortueux et discontinu est généralement très imperméable aux agents agressifs. Pour un type de configuration donné la tortuosité peut être reliée à la porosité :

$$\tau = \frac{1}{\varepsilon.F} \quad \text{Eq.III-4}$$

avec :

$\tau$  : la tortuosité ;

$\varepsilon$  : la porosité totale

F: présenté par les géologues sous l'appellation de facteur de formation, généralement évaluée par conduction électrique ou par diffusion des ions  $\text{Cl}^-$  [26].

Une faible tortuosité nécessite une porosité importante, mais une porosité importante n'induit pas systématiquement une faible tortuosité. En effet, la tortuosité est dépendante, à la fois, de la qualité de vide à travers le matériau et de l'interconnectivité de ces vides.

### III.3.4. La résistivité électrique

La résistivité électrique est probablement, parmi toutes les propriétés physiques, celle qui présente le domaine de variation le plus important [27]. Elle peut être utilisée pour mesurer la résistivité du béton permettant d'obtenir une évaluation du degré d'humidité, de la dimension et de la tortuosité des pores du béton, comme elle peut être interprétée pour évaluer le niveau d'activité de corrosion du béton armé. La résistivité est très sensible à la qualité du béton (dosage en ciment, E/C, mûrissement, ajouts minéraux).

L'interprétation des mesures de résistivité, comme le montre la formule (Eq.IV-4), sera utile dans le cas où elle s'associe en parallèle avec d'autres types de mesure, telles que la porosimétrie à l'eau et au mercure pour calculer la perméabilité à l'eau liquide.

### III.4. Propriétés de transfert :

La durabilité est, dans la plupart des cas, liée à l'aptitude du matériau à résister à la pénétration d'agents agressifs. De plus, tout mécanisme de dégradation, même interne au béton, fait intervenir un processus de transport d'eau, et éventuellement d'ions ou de gaz.

Les propriétés de transfert du béton (perméabilité et coefficient de diffusion) vont donc jouer un rôle clé dans l'évaluation et la prévision de la durabilité des ouvrages. Dans le cas de la corrosion des armatures, c'est le transport de l'eau, du dioxyde de carbone, de l'oxygène, et éventuellement des ions chlorure s'ils sont présents, qui est en jeu.

#### III.4.1. La perméabilité :

Dans de nombreux cas, ce n'est pas uniquement l'étanchéité des éléments qui contrôle la durabilité des structures mais aussi la perméabilité du matériau béton. Plusieurs études et relevés sur le terrain montrent que les causes principales de la mauvaise performance du béton sont plus ou moins liées à la facilité avec laquelle un fluide ou un ion pénètre dans la porosité du béton. La perméabilité est donc un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures.

La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY qui est valide en régime d'écoulement laminaire [27].

$$Q = -K \frac{A}{\mu} \frac{dP}{dz} \quad \text{Eq.III-5}$$



avec :

Q : Débit volumique du fluide ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ;

$\mu$  : Viscosité dynamique (Pa.s) ;

K : Perméabilité du milieu ( $\text{m}^2$ ) ;

A : Aire apparente du matériau ( $\text{m}^2$ ) ;

$\frac{dP}{dz}$  : Gradient de pression.

La perméabilité  $K$  est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en  $\text{m}^2$ . L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau ce qui est rarement vrai dans le cas du béton.

La perméabilité  $K$  peut être utilisée pour estimer l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide. Plus la valeur de  $K$  est élevée, plus le matériau est perméable et, inversement, plus la valeur de  $K$  est faible, plus le matériau est imperméable.

Dans le cas du béton, on peut mesurer expérimentalement la valeur  $K$  en utilisant des appareils spécialement conçus à cet effet. En pratique, des méthodes différentes sont utilisées pour mesurer la perméabilité à l'eau et au gaz du béton.

### III.4.2. La diffusion

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration entre deux points du milieu, il y aura un transport du constituant de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée [27].

Les transports par diffusion peuvent se produire sous deux formes :

- En phase liquide (ions chlore, sulfates) ;
- En phase gazeuse (oxygène,  $\text{CO}_2$ ).

Le transport en phase liquide concerne la diffusion des constituants en solution dans la phase liquide (les ions chlore, les sulfates). Elle intervient, par exemple, dans l'attaque par l'eau de mer et la corrosion des aciers d'armature.

Le transport en phase gazeuse concerne, par exemple, la diffusion de la vapeur d'eau dans un béton partiellement saturé ou la diffusion de l'oxygène ou du  $\text{CO}_2$ .

Les différents mécanismes d'attaque du béton font généralement intervenir un ou plusieurs types de transferts de masse : en phase liquide, en phase gazeuse ou par écoulement de la solution interstitielle.

### III.5. Paramètres influençant la structure poreuse du béton :

#### III.5.1. La teneur en eau E/C

L'eau est l'un des éléments essentiels du béton qui intervient à toutes les étapes de la vie du matériau. Introduite dans le béton lors de sa fabrication, l'eau confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant son écoulement et son moulage) et participe au développement de la réaction d'hydratation et donc des résistances mécaniques. Cependant l'excédent d'eau de gâchage présente un caractère néfaste car il induit une porosité capillaire plus importante et est responsable du ressuage, du retrait de dessiccation, de dégradations en cas de gel et peut permettre le transport des agents agressifs. Il faut donc trouver un équilibre entre la quantité d'eau nécessaire aux mécanismes d'hydratation et celle nécessaire à la plasticité du matériau frais.

Le rapport E/C a donc une importance considérable sur l'interconnexion du réseau poreux. De nombreuses recherches ont été menées pour déterminer l'influence du rapport E/C sur la structure poreuse du béton.

La figure III.10 présente l'influence de rapport E/C sur la structure porosimétrique à l'âge de 28 jours, les pores capillaires de dimension supérieure à 100 nm ne subsistent plus que dans les pâtes gâchées avec des rapports E/C supérieurs à 0,50 [28].

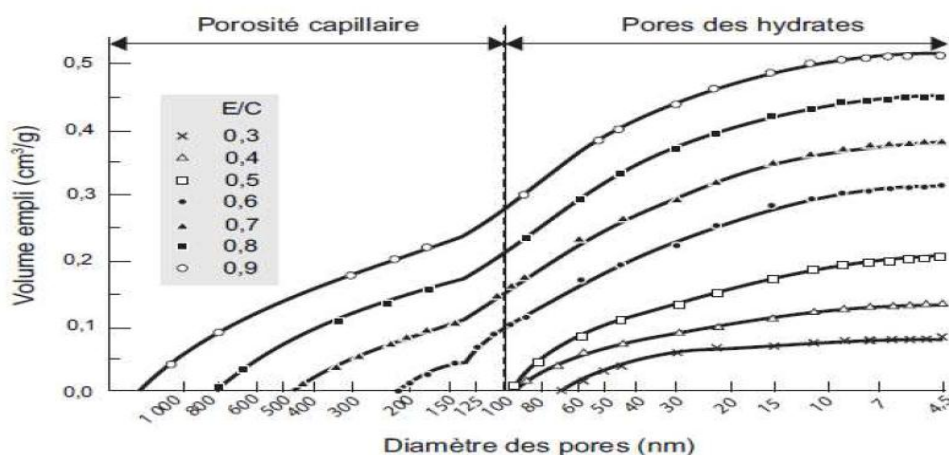
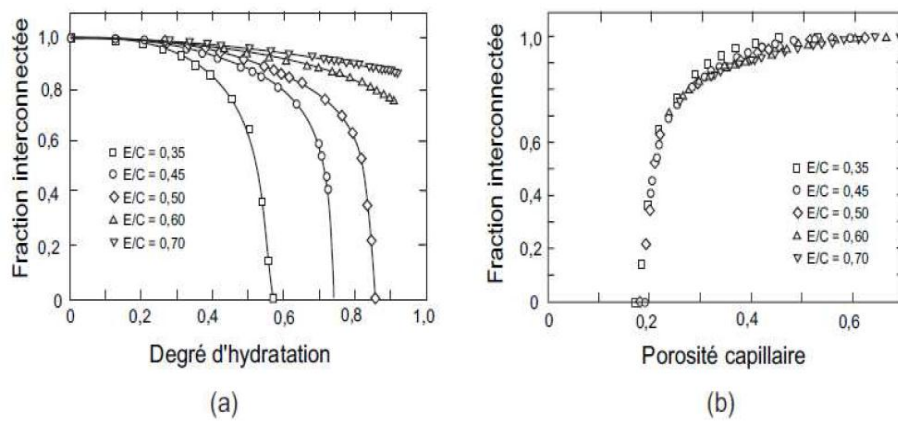


Figure III. 9:Influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de pâtes de ciment Portland âgées de 28 jours [28]

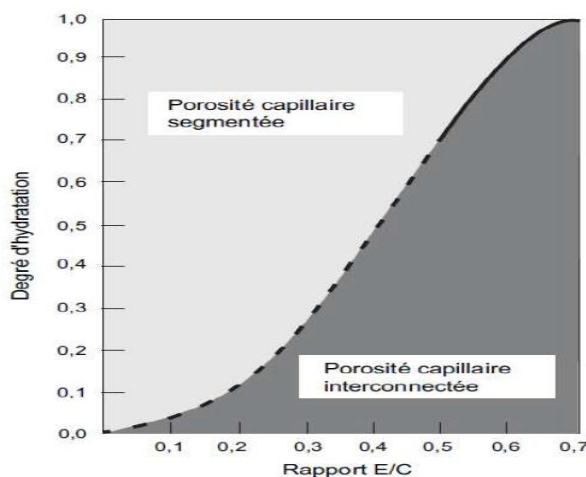
La figure III.9 montre que la porosité capillaire n'existe plus à hydratation complète que pour des rapports E/C inférieurs à 0,42. Au-dessus de ce seuil, pour un rapport E/C de 0,50, la figure ne montre néanmoins plus de porosité capillaire à 28 jours, âge pour lequel l'hydratation est loin d'être achevée. En fait, cette contradiction n'est qu'apparente et cette différence met en évidence un autre phénomène important : la connectivité des pores capillaires. L'interconnexion des pores capillaires est une caractéristique importante, car elle influe sur les possibilités de transfert dans le béton. Selon que les pores capillaires sont ou non interconnectés, la dimension des chemins de pénétration des espèces agressives est fortement modifiée [18].



**Figure III. 10: Interconnexion du réseau des pores capillaires [18].**

La figure III.10a montre la variation de fraction des capillaires interconnectés en fonction du degré d'hydratation pour différents rapports E/C. En transformant ces données en fonction de la porosité capillaire (figure IV.10b), une courbe unique est obtenue. L'interconnexion des pores capillaires ne dépend que de la porosité capillaire. En dessous d'une porosité capillaire de 18 %, les pores capillaires ne sont plus interconnectés [18].

La figure III.11 illustre l'influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur l'interconnexion des capillaires. Pour des rapports E/C supérieurs à 0,7, la porosité capillaire est toujours interconnectée. Les transferts dans ces matériaux ont donc toujours lieu à travers un système interconnecté de pores capillaires quel que soit le degré d'hydratation donc quel que soit l'âge.



**Figure III. 11: Influence du rapport E/C et du degré d'hydratation sur la continuité des pores capillaires [18].**

La valeur limite la plus élevée, qui correspond donc à l'environnement le moins agressif, est égale à 0,65. Dans ce cas, on admet donc que les transferts peuvent se produire à travers la porosité capillaire mais dès que l'agressivité des environnements augmente les valeurs limites diminuent. La figure IV.11 montre que dans ce cas la porosité capillaire n'est plus continue dès 60% d'hydratation. Lorsque le degré d'hydratation est supérieur à 0,7, les pores capillaires sont toujours reliés entre eux. Lorsque le rapport E/C de gâchage diminue en dessous de cette valeur, la segmentation du réseau capillaire s'obtient à des degrés d'hydratation plus faibles. La dimension des pores capillaires étant beaucoup plus grande, ils jouent un rôle prépondérant dans les transferts et la durabilité des bétons. La porosité capillaire diminue avec le rapport E/C et avec le degré d'hydratation. Un autre facteur important est la connectivité des pores capillaires. Pour une porosité capillaire inférieure à 18%, les pores capillaires ne communiquent plus entre eux [18].

### III.5.2. Influence de la durée de cure humide

La figure IV.12 montre l'influence de la durée de cure sur la porosité capillaire. Une période de cure plus longue diminue très significativement la perméabilité parce qu'elle favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les capillaires existants.

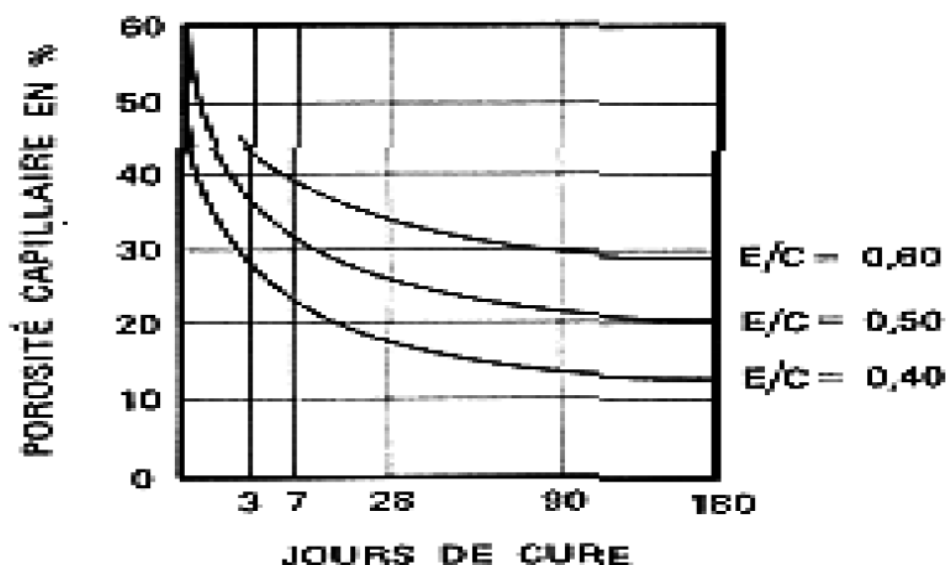


Figure III. 12: Évolution de la porosité capillaire en fonction de la durée de la cure [29].

### III.5.3. Influence du degré de saturation

La perméabilité au gaz diminue avec le degré de saturation du béton à la différence de la perméabilité à l'eau qui augmente lors d'une imbibition [30]. Un séchage modéré ne permet pas le drainage des pores les plus fins, et la perméabilité mesurée est sous-évaluée. Un séchage trop poussé entraîne une dégradation de la microstructure du matériau conduisant à une perméabilité artificiellement accrue ou à une surévaluation de la perméabilité du béton en service. Un béton poreux avec une saturation d'eau élevée peut témoigner d'une perméabilité au gaz inférieure à un béton à haute résistance sec (peu poreux). C'est pourquoi les échantillons doivent autant que possible être séchés avant d'effectuer une mesure [31].

Le choix de la température de séchage est délicat. En effet, une température trop élevée peut engendrer une évaporation de l'eau liée et une modification des hydrates: l'ettringite puis le C-S-H [32]. Généralement, il convient d'appliquer un séchage par paliers de température croissants, de manière à diminuer d'une part les gradients de température et d'autre part les gradients hydriques. Cependant, une comparaison entre un béton séché par paliers de température croissants, et un béton ayant subi un séchage appliqué directement à 105°C montre que la perméabilité au gaz n'augmente que légèrement [31].

### III.5.4. Influence de la température

L'influence de la température sur la perméabilité à l'eau du béton a fait l'objet d'une étude menée par Jooss et Reinhard [33]. Les auteurs ont trouvé que la température a une

influence sur la perméabilité à l'eau. En effet, la perméabilité augmente entre 13 à 62% quand la température est augmentée de 20 à 50°C, puis de 3 à 55% additionnels quand la température atteint 80°C selon le type de béton. Cette variation du taux d'augmentation dépend du type de béton. Ces auteurs expliquent ces effets par la diminution de la viscosité de l'eau avec la température, ce qui provoque une augmentation de la conductivité hydraulique.

### **III.6. Capillarité :**

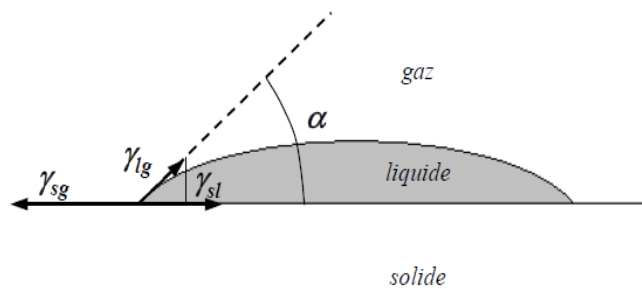
#### **III.6.1. Tension interfaciale fluide/fluide - tension superficielle**

Considérons deux fluides non miscibles en contact l'un avec l'autre, la surface de contact entre ces deux phases, ou interfaces, se comporte comme une membrane élastique tendue de manière uniforme. La tension appliquée sur l'interface est appelée tension de surface ou tension interfaciale [34]. La tension interfaciale par rapport à l'air est habituellement appelée tension superficielle.

#### **III.6.2. Tension interfaciale fluide/solide – mouillabilité**

Lorsque deux fluides différents (l'air et l'eau dans notre cas) sont en contact avec une surface solide, il se forme un angle entre le liquide et le solide au triple liquide/solide/gaz (figure IV.13). A l'équilibre, cette configuration dépend des valeurs relatives des tensions de surface entre les 3 phases. L'angle de contact  $\alpha$  entre la surface du liquide et la surface du solide quantifie le mouillage :

- Pour  $\alpha < 90^\circ$  ( $\cos(\alpha) > 0$ ), la tension interfaciale solide/gaz est supérieure à la tension interfaciale liquide/gaz ( $\gamma_{sg} > \gamma_{lg}$ ), le liquide est dit mouillant ;
- Pour  $\alpha = 0^\circ$ , il y a étalement complet de la goutte et on parle de mouillage parfait ;
- Pour  $\alpha > 90^\circ$  ( $\cos(\alpha) < 0$ ,  $\gamma_{sg} < \gamma_{lg}$ ), le liquide est non mouillant.



**Figure III. 13: Représentation schématique de l'équilibre des forces de tensions interfaciale s'exerçant sur la périphérie d'une goutte de liquide déposée sur un solide [34].**

L'équilibre mécanique se traduit, en projection sur le plan solide, par la relation :

$$\gamma_{lg} \cos \alpha = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} \quad \text{Eq.III-6}$$

$\gamma_{lg}$ : tension interfaciale liquide/gaz ( $\text{N.m}^{-1}$ ) ;

$\gamma_{sg}$ : tension interfaciale solide/gaz ( $\text{N.m}^{-1}$ ) ;

$\gamma_{sl}$ : tension interfacialesolide/liquide ( $\text{N.m}^{-1}$ ) ;

$\alpha$ : angle de contact entre le solide et le liquide ( $^{\circ}$ ).

L'angle de contact entre une goutte et une surface plane et lisse est constant dans des conditions données, mais varie avec la rugosité du solide ou lorsque le front de la goutte avance/recule sur le solide : c'est l'hypothèse de l'angle de contact. On appelle angle d'avancée la valeur la plus grande de l'angle de contact et angle de reculée la plus petite.

La surface des capillaires et des pores n'est pas lisse dans un milieu poreux, comme les bétons et les mortiers ; la solubilité de certaines phases modifie les propriétés chimiques de l'eau y circulant et les interactions entre les hydrates du ciment et l'eau peuvent également modifier l'angle de contact liquide/solide.

### III.6.3. Capillarité – pression capillaire

D'après ce qui précède, la présence d'un liquide dans un milieu poreux implique la formation d'un ménisque à l'interface gaz/liquide. D'après la loi de Laplace, la pression de la phase liquide n'est donc pas égale à la pression du gaz et, par définition, on appelle pression capillaire  $P_c$  la différence entre la pression du gaz et celle du liquide (Eq.III-7).

$$P_c = P_0 - P_l \quad \text{Eq.III-7}$$

$P_c$ : pression capillaire (Pa);

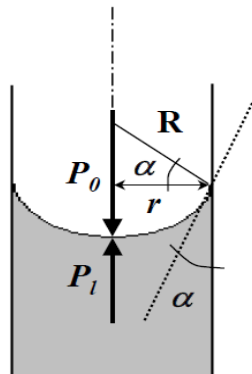
$P_0$ : pression du gaz ( $P_{\text{atm}}$  dans l'air) (Pa) ;

$P_l$ : pression du liquide (Pa) ;

$R$  : rayon de courbure du ménisque (m) ;

$r$  : rayon du capillaire (m) ;

$\alpha$ : angle de contact entre le solide et le liquide ( $^\circ$ ).



**Figure III. 14: Représentation schématique des forces appliquées de part et d'autre d'un ménisque dans un capillaire [34].**

La pression capillaire est aussi égale au poids de la colonne d'eau à l'équilibre dans le tube :

$$P_c = \Delta\rho g h \quad \text{Eq.III-8}$$

$\Delta\rho$  : différence de masse volumique entre air et eau ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ) ;

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9.806 \text{ m.s}^{-2}$ ) ;

$h$  : hauteur d'ascension capillaire ou hauteur atteinte par le ménisque comptée à partir de la surface d'eau libre (m).

L'équation de Laplace peut s'exprimer de la manière suivante :

$$P_c = \frac{2\gamma}{r} \cos \alpha \quad \text{Eq.III-9}$$



En combinant les équations Eq.III-8 et Eq.III-9, on obtient l'équation de JURIN qui permet de calculer la hauteur d'équilibre  $h$  atteinte par le ménisque en fonction du rayon capillaire :

$$h = \frac{2 \gamma \cos \alpha}{\Delta \rho g r} \quad \text{Eq.III-10}$$

#### III.6.4. Imbibition/drainage – aspect dynamique de la capillarité

L'imbibition capillaire est le résultat de la préférence du solide pour un fluide, ou mouillabilité préférentielle, sans qu'une pression extérieure ne soit appliquée. Elle a pour conséquence le déplacement du fluide le moins mouillant, ici l'air, au profit du fluide le plus mouillant, ici l'eau.

La pression à l'intérieur du liquide dans un capillaire au niveau de l'interface est inférieure à la pression atmosphérique. Entre le moment où l'échantillon est mis en contact avec le fluide et le moment où l'équilibre est atteint, la pression qui s'applique à l'interface diminue. Le gradient de pression entre l'état initial et l'équilibre correspond à l'ascension de l'eau à l'intérieur de l'échantillon.

Soit  $x$  le déplacement vertical d'un ménisque dans un capillaire. Au fur et à mesure que l'eau pénètre dans le capillaire,  $x$  augmente et le gradient de pression diminue. La vitesse d'écoulement de l'eau est inversement proportionnelle à la viscosité dynamique du fluide  $\eta$  (Pa.s) et proportionnelle à ce gradient de pression et tend à décroître avec le temps. De plus, la vitesse d'écoulement dans un tube varie selon la distance à la paroi du tube : elle est considérée nulle au contact de la paroi et est maximale au centre. Cette vitesse d'écoulement maximale  $V_{max}$  au centre du tube est donnée par la loi de Poiseuille :

$$V_{max} = \frac{dP}{dx} \frac{r^2}{4 \eta} \quad \text{Eq.III-11}$$

La vitesse d'écoulement maximale est donc proportionnelle au carré du rayon du capillaire. Le volume d'eau  $V$ , dans le capillaire est défini par  $V = \pi r^2 x$  et son accroissement au cours du temps, le débit  $Q$ , est défini par :

$$Q = \frac{dV}{dt} = r^2 \pi \frac{dx}{dt} \quad \text{Eq.III-12}$$

Ou selon la loi de Poiseuille :

$$Q = \frac{\pi r^3 \gamma \cos \alpha}{4 x \eta} \quad \text{Eq.III-13}$$

Ces égalités permettent d'établir l'équation différentielle suivante :

$$x \frac{dx}{dt} = \frac{r\gamma \cos \alpha}{4\eta} \quad \text{Eq.III-14}$$

L'intégration de cette équation conduit à l'équation de Washburn qui donne l'expression de  $x$  en fonction du temps :

$$x = \sqrt{\frac{r\gamma \cos \alpha}{2\eta} t} \quad \text{Eq.III-15}$$

La montée du ménisque dans un capillaire est donc proportionnelle aux racines carrées du rayon du capillaire et du temps écoulé depuis le contact entre le capillaire et le fluide. De la même manière, en remplaçant  $x$  par son expression Eq.III-15 dans celle du volume d'un cylindre, on obtient :

$$V = \pi r^2 \sqrt{\frac{r\gamma \cos \alpha}{2\eta} t} \quad \text{Eq.III-16}$$

La relation de proportionnalité entre la racine carrée du temps et les hauteurs observées de la frange capillaire et prises de masse de l'échantillon impose pour l'établissement des cinétiques d'imbibition capillaire de les représenter en fonction de la racine carrée du temps.

**III.7. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons montré que le transport d'humidité dans les matériaux cimentaires dépend de l'interconnexion des pores capillaires. La porosité capillaire est principalement liée au rapport E/C et à l'hydratation du ciment.

La réduction de la porosité du béton dépend principalement de sa conception et de sa mise en œuvre. Après avoir détaillé l'organisation de la porosité de ces matériaux, nous avons précisé les propriétés intrinsèques à la porosité pouvant être affectées par ces modifications microstructurales et montré que l'étude de la porosité et sa géométrie constitue une première étape indispensable avant la modélisation des transferts de fluides. Ses capacités de stockage et de transfert varient selon son volume, sa forme et sa complexité géométrique. Ces paramètres traduisent la capacité d'un matériau à absorber l'eau par capillarité pour des conditions initiales et aux limites données. C'est une caractéristique macroscopique intrinsèque du matériau poreux, utilisée dans l'étude de la durabilité des matériaux de construction.

La suite de ce manuscrit se propose de décrire certaines propriétés des matériaux cimentaires (Ouvrabilité, porosité et imbibition capillaire), avec l'objectif d'étudier l'influence d'un nouveau produit sur ces propriétés. L'action du produit biologique utilisé sera évaluée aussi bien sur sa capacité à modifier le réseau poreux que sur ses effets au niveau de la prise du ciment et de sa rhéologie à l'état frais... afin de qualifier ce produit comme un bio-adjuvant.

**Chapitre IV : Procédures expérimentales**

---

### **IV.1. Introduction :**

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'utilisation en tant que bio-adjuvant d'un nouveau produit plus respectueux de l'environnement sur différents types de mortiers. Dans le cadre de ce travail, des essais de caractérisation ont été réalisés sur des mortiers témoins et des mortiers adjuvés permettant de valider si le bio-adjuvant peut être assimilé à un adjuvant. Dans ce chapitre, le protocole expérimental des essais réalisés est présenté.

### **IV.2. Matériaux utilisés :**

Les échantillons élaborés pour cette étude sont des mortiers (ciment + eau + sable). Dans tous les cas, l'adjuvant ajouté est assimilé à de l'eau. Le sable utilisé est un sable naturel, conditionné en sachets de  $1350 \pm 5$  g. L'eau du robinet a été utilisée pour tous les échantillons. Différentes nuances cimentaires normalisées ont été utilisées.

#### **IV.2.1. Le bio-adjuvant :**

Le développement de bétons plus éco-respectueux est essentiel aujourd'hui puisque les bâtiments ont une durée de vie limitée et qu'ils sont amenés à être déconstruits. Lors de cette déconstruction, le maximum de matériaux est recyclé, et il paraît donc évident qu'un béton éco-respectueux sera plus facilement recyclé et réemployé par la suite. Cette problématique de développement de béton plus respectueux concerne le projet SEPOLBE programme de recherche en partenariat avec les laboratoires ICube, LISE, INRA-B<sub>2</sub>HM et LPSC et l'entreprise CHRYSO.

Ce bio-adjuvant, se présentant sous forme liquide, est assimilé à de l'eau au sens de la norme NF EN 934- 2 et il est incorporé directement au mélange, en prenant garde de conserver un rapport E/C constant. L'extrait sec conventionnel, c'est-à-dire le taux de matière sèche entrant dans la composition du bio-adjuvant, a été déterminé selon la norme NF EN 480-8. Sa valeur, très faible, est égale à 0,06%. Il s'agit d'un bio-surfactant d'origine bactérienne. Les bio-surfactants, produits par certains micro-organismes, sont des molécules amphiphiles possédant des propriétés tensioactives. Leur nature et leurs propriétés dépendent du type de micro-organisme utilisé, de la souche testée, du substrat nutritif disponible ainsi que des conditions de culture [35]. Ce bio-surfactant a été obtenu à partir de souches bactériennes de l'environnement (*Pseudomonas fluorescens*) cultivées selon un protocole original, se basant sur une récupération sélective de la biomasse bactérienne par rapport au milieu nutritif, permettant l'utilisation de la solution de bio-surfactant sans qu'une phase de purification ne soit nécessaire.

La concentration du bio-adjuvant ici a été optimisée pour un dosage de 1,5%. En effet, les recherches précédentes ont évalué l'effet du bio-adjuvant sur les propriétés mécaniques et la porosité des mortiers à base de CEM I en ajoutant différentes concentrations (0 %, 0,5 %, 1,5 %, 2 % et 2,5 % du poids de ciment). Un optimum de concentration de 1,5 % a été déterminé pour obtenir des résistances mécaniques du même ordre de grandeur que les échantillons non adjuvés, et supérieures au minimum requis par la norme 196-1 [35].

#### IV.2.2. Ciments :

Trois nuances cimentaires ont été utilisées dans cette étude. Un ciment Portland CEM I (CEM I 52,5 N CE CP2 NF), un ciment CEM II (CEM II/B-S 42.5 N CE CP1 NF) et un ciment au laitier, CEM III (CEM III/A 42,5 N-LH CE PM-ES-CP1 NF) produits par la société Holcim (cimenterie d'Altkirch). Les caractéristiques spécifiques, ainsi que les compositions chimiques de ces ciments sont présentées dans le tableau IV.1.

**Tableau IV. 1: Caractéristiques spécifiques et composition chimiques des nuances cimentaires utilisées.**

		CEM I	CEM II	CEM III
Finesse de mouture (cm <sup>2</sup> /g)		4250	3800	4400
Teneur en oxydes (Pourcentage massique, ± 0.1)	SiO <sub>2</sub>	19.8	24.1	28.9
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.5	6.2	8.7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.2	2.4	1.9
	CaO	61.3	54.6	48.1
	MgO	4.6	5.5	5.5
	SO <sub>3</sub>	3.7	3	2.9
	K <sub>2</sub> O	1.07	0.88	0.97
	Na <sub>2</sub> O	0.27	0.31	0.39
Compositions		Clinker : 95 %  Constituants secondaires : 5%	Clinker : 67%  Laitier de haut fourneau : 31%  Constituants secondaires : 2%	Clinker : 37%  Laitier de haut fourneau : 61%  Constituants secondaires : 2%
Composition potentielle du clinker	C <sub>3</sub> S	58.2	57	58.2
	C <sub>3</sub> A	7.6	7	7.6
	C <sub>4</sub> AF	9.9	10	9.9

### IV.3. Préparation des échantillons :

#### IV.3.1. composition :

Les mortiers ont été fabriqués selon la norme NF EN 196-1 [36] : la quantité de sable est constante (1350 g), pour 450 g de ciment. La quantité d'eau (+ bio-adjuvant) a été ajustée pour obtenir un rapport E/C de 0,5.

La composition normalisée des échantillons sans bio-adjuvant est la suivante :

- 450 g de ciment ;
- 225 g d'eau ;
- Un sachet de sable normalisé de 1 350 g.

Afin de trouver la composition des échantillons avec bio-adjuvant, on raisonne de la manière suivante : dans notre cas, on ajoute une fois sur deux 1.5% de bio-adjuvant aux échantillons. Cette addition est faite en raisonnant d'un point de vue massique: les 1.5% sont calculés par rapport à la masse de ciment, soit 6.75g de bio-adjuvant. De plus, comme le bio-adjuvant est sous forme liquide, on considère que sa masse entre dans les 225g d'eau. La composition des échantillons est donc la suivante :

- 450g de ciment ;
- 218.25g d'eau ;
- 6.75g de bio-adjuvant ;
- Un sachet de sable normalisé de 1 350g.

Le Tableau IV.2 résume la composition des gâchées des différents échantillons de mortier.

**Tableau IV. 2: Composition des échantillons de mortier.**

	1	2	3	4	5	6
Sable	1 sachet	1 sachet	1 sachet	1 sachet	1 sachet	1 sachet
Ciment	450g CEM I	450g CEM I	450g CEM II	450g CEM II	450g CEM III	450g CEM III
Eau	218.25g	225g	218.25g	225g	218.25g	225g
Bio-Adjuvant	6.75g	0g	6.75g	0g	6.75g	0g

**IV.3.2. Fabrication des échantillons :**

Le mortier utilisé pour les éprouvettes est fabriqué, selon la norme EN 196-1 [36], de la manière suivante:

1. Peser 225g d'eau dans un bécher à l'aide d'une balance de précision  $\pm 1$ g (s'il s'agit des gâchées contenant de Bio-Adjuvant, peser 6,75 g de bio-adjuvant à l'aide de la balance de grande précision ( $\pm 0,01$ g). et peser 218.25g d'eau au lieu de 225g d'eau),
2. Verser l'eau dans le récipient du malaxeur, pour les gâchées contenant de Bio-Adjuvant ; rincer 3 fois le contenant du bio-adjuvant avec l'eau pesée préalablement afin de s'assurer que tout le bio-adjuvant est transvasé dans le récipient du malaxeur et ajouter le reste de l'eau dans le récipient du malaxeur
3. Peser 450 g de Ciment ( $\pm 1$ g) et l'ajouter dans le récipient du malaxeur
4. Fixer le récipient sur le malaxeur et le démarrer. Le malaxeur utilisé est automatique, il démarre à vitesse lente,
5. Au bout de 30 secondes de malaxage, ajouter le sachet de sable,
6. le malaxage continu à vitesse lente pendant 30 secondes puis à grande vitesse pendant 30 secondes,
7. le malaxeur s'arrête, décoller le mortier déposé sur le bord du récipient afin que le mélange soit le plus homogène possible à l'aide d'une spatule métallique, refixer le récipient sur le malaxeur,
8. Le malaxage recommence automatiquement à grande vitesse pendant 1 minute,
9. Décrocher le récipient une fois que le malaxeur s'arrête,
10. Disposer un moule d'éprouvettes  $5 \times 5 \times 5$  cm<sup>3</sup> propre et sec. Asperger le moule avec l'huile de décoffrage et essuyer le surplus à l'aide d'un papier absorbant,
11. Remplir le moule à mi-hauteur avec le mortier en faisant attention à remplir les compartiments de manières égales,
12. Fixer le moule sur la table à choc et lancer un cycle de 60 chocs,
13. Remplir le moule entièrement avec le mortier,
14. Fixer à nouveau le moule pour effectuer un cycle de 60 chocs,
15. Décrocher le moule, araser à l'aide d'une règle métallique,
16. Disposer le sachet de sable dont les bords ont été coupés sur le moule afin d'éviter le retrait de dessiccation du mortier,



17. Laisser le moule dans la chambre humide ( $>98\%$  d'humidité contrôlée et température constante de  $20^{\circ}\text{C}$ ),
18. Après 24h, sortir le moule de la chambre, démouler délicatement les échantillons et les replacer dans la chambre immédiatement après avoir marqué le numéro de la gâchée sur les échantillons,
19. Nettoyer et sécher correctement le moule.

#### IV.4. Essai d'affaissement « mini cône » :

##### IV.4.1. Procédure de l'essai

Un mini-cône de 15 cm de hauteur a été utilisé pour le test d'affaissement (figure IV.1). La procédure consiste à remplir le cône de pâte de mortier frais, d'enlever le cône et de mesurer la perte de hauteur ou l'affaissement du mortier.

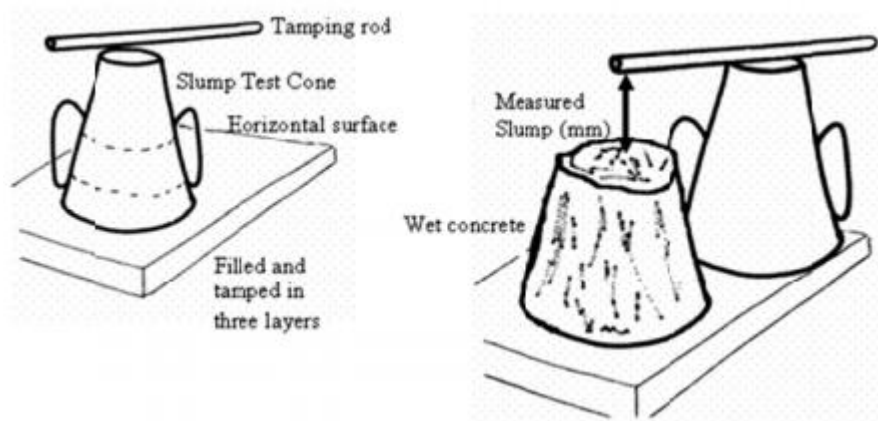


Figure IV. 1: Descriptif du test d'affaissement [35].

Il n'existe pas une norme spécifique pour l'essai d'affaissement au mini cône d'ABRAMS, l'essai est réalisé selon « La Méthode Mortier Béton Équivalent » (MBE) [16].

L'essai est effectué selon les étapes suivantes :

1. Humidifier le mini cône d'ABRAMS,
2. Remplir le cône au 1/3 puis piquer 25 coups (piquer de manière uniformément répartie jusqu'au fond du moule),
3. Remplir le cône au 2/3 puis piquer 25 coups (jusqu'à ce que la tige pénètre légèrement dans la 1<sup>ère</sup> couche),
4. Remplir le cône à refus puis piquer à nouveau 25 coups (jusqu'à ce que la tige pénètre légèrement dans la 2<sup>ème</sup> couche),
5. Araser le cône en faisant rouler la tige de piquage,
6. Soulever verticalement le cône,
7. Mesurer l'affaissement du mortier à l'aide du réglet. Cet affaissement est la hauteur entre le haut du cône et le point le plus haut du mortier affaissé.

Pour qu'un produit soit un plastifiant/réducteur d'eau, il doit présenter une réduction d'eau d'au moins 5% par rapport au témoin à consistance égale [37].

#### IV.4.2. Détermination de la classe d'affaissement

La mesure en mm de la hauteur d'affaissement peut être liée à la consistance du mortier. L'échelle de mesure et de grandeur est ainsi créée. La valeur d'affaissement notée A indique plus précisément que l'œil l'état de consistance du mortier. Le tableau IV.3 représente les classes d'affaissement du mortier selon la méthode MBE.

**Tableau IV. 3: Classe d'affaissement du mortier.**

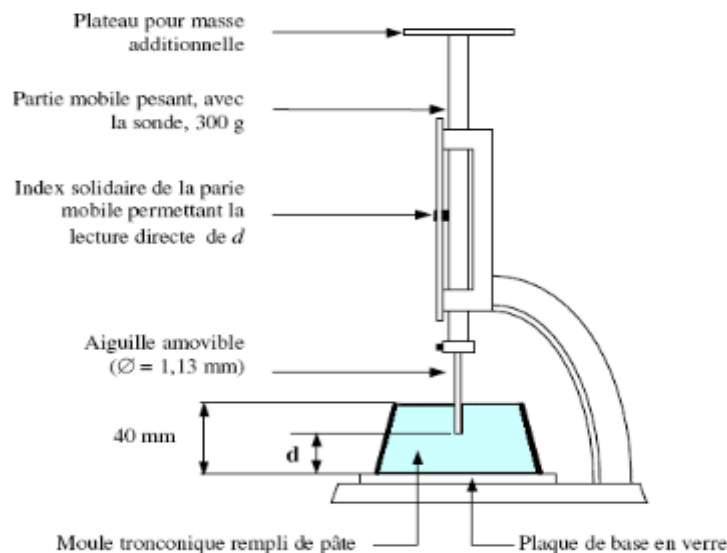
Classe	Affaissement du mortier A (mm)
S <sub>1</sub>	De 5 à 20
S <sub>2</sub>	De 25 à 45
S <sub>3</sub>	De 50 à 75
S <sub>4</sub>	De 80 à 105
S <sub>5</sub>	≥110

#### IV.5. Le temps de prise (L'aiguille de Vicat) :

Le temps de prise est déterminé par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans un mortier ou une pâte de ciment de référence au cours du temps. Le temps de début de prise correspond au temps nécessaire à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus que de  $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Le temps de fin de prise est déterminé lorsque l'aiguille ne pénètre plus pour la première fois qu'à  $0.5 \text{ mm}$  dans l'éprouvette.

Habituellement, les essais de temps de prise sont réalisés sur de la pâte de ciment, comme décrit dans la norme NF EN196-3, « Méthodes d'essais des ciments – Détermination du temps de prise et de la stabilité » [38]. Cependant, lorsque l'on étudie un adjuvant, ou un produit en tant qu'adjuvant, il faut se référer à la norme NF EN 480-2 : « Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Méthodes d'essai – Détermination du temps de prise » [39]. Dans cette dernière, il est bien précisé que l'essai doit avoir lieu sur du mortier avec ou sans adjuvants. A part ce détail des plus importants, le reste est identique dans les deux normes (appareil, mode opératoire, valeurs seuils, etc.)

Le matériel nécessaire à cet essai est l'appareil de Vicat équipé de son aiguille (Figure IV.2).



**Figure IV. 2: Appareil de Vicat et son aiguille (source : memoireonline.com).**

Le mode opératoire, tel que décrit dans la norme, laisse une part d'initiative à la personne réalisant les essais, notamment sur l'intervalle de temps entre les mesures. En ce qui concerne les essais réalisés pour cette étude, le mode opératoire est le suivant :

1. Préparer le mortier ;
2. Remplir le moule placé sur la plaque en verre ;
3. Araser ;
4. Placer l'éprouvette sur l'appareil de Vicat automatique et préparer la bandelette de papier devant recevoir les résultats de l'essai ;
5. A  $T = 2h30$  (âge du mortier), lancer le début des mesures en choisissant un intervalle de 10 minutes entre deux mesures. Ainsi, toutes les 10 minutes l'aiguille se place verticalement au ras du mortier, puis est relâchée afin d'effectuer une chute libre verticale. L'aiguille est ensuite automatiquement remontée par l'appareil et l'éprouvette tourne légèrement afin que le piquage suivant soit réalisé dans une zone non piquée du mortier ;
6. A  $T = 7h$ , vérifier que l'aiguille ne s'enfonce pas de plus de 0.5mm dans le mortier et arrêter l'appareil de Vicat. Si l'enfoncement est supérieur à 0.5mm, alors laisser l'essai se poursuivre.
7. Démouler l'éprouvette, jeter le mortier et nettoyer le moule, la plaque en verre et l'aiguille ;
8. Retirer la bandelette de papier et analyser les résultats.

La norme précise que l'échantillon doit être placé, entre chaque chute d'aiguille, dans la chambre humide avec les conditions de cure suivantes :

- Température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ;
- Humidité relative  $\geq 90\%$ .

L'appareil de Vicat automatique ne pouvant pas être placé dans la chambre humide pour des raisons de sécurité, l'essai a ici été réalisé en continu dans le laboratoire dans les conditions suivantes :

- Température de 24.6°C ;
- Humidité relative de 40%.

Les essais précédemment réalisés pas dans d'autres recherches [35], ont montré que l'humidité relative de la pièce n'impactait que très légèrement le temps de prise. Par ailleurs, l'étude se basant avant tout sur la comparaison des résultats avec le témoin, les conditions de températures et d'humidité de l'essai ne sont pas à fixer strictement, tant que ce sont les mêmes pour tous les produits.

Sur la bande de papier est tracée l'évolution de l'enfoncement de l'aiguille en fonction du temps, à raison d'un point toutes les 10 minutes. Les données sont entrées dans le logiciel Excel afin d'obtenir une courbe de tendance. Le temps de début de prise est ensuite déterminé pour l'enfoncement de 4 mm de l'aiguille dans le mortier et les temps de fin de prise, pour 0.5mm.

#### IV.6. Essai de porosité :

L'essai permettant la détermination de la porosité totale accessible à l'eau et de la masse volumique apparente d'un béton ou d'un mortier est décrit dans la norme NF 18-459 [40]. Il consiste en 3 pesées d'un même corps d'éprouvette : une pesée dans l'eau ( $M_{eau}$ ), une pesée humide dans l'air ( $M_{air}$ ) et une pesée sèche dans l'air ( $M_{sec}$ ). Les 3 masses obtenues permettent de déterminer la porosité totale accessible à l'eau et la masse volumique d'un mortier durci grâce aux deux formules ci-dessous :

- Porosité totale accessible à l'eau :

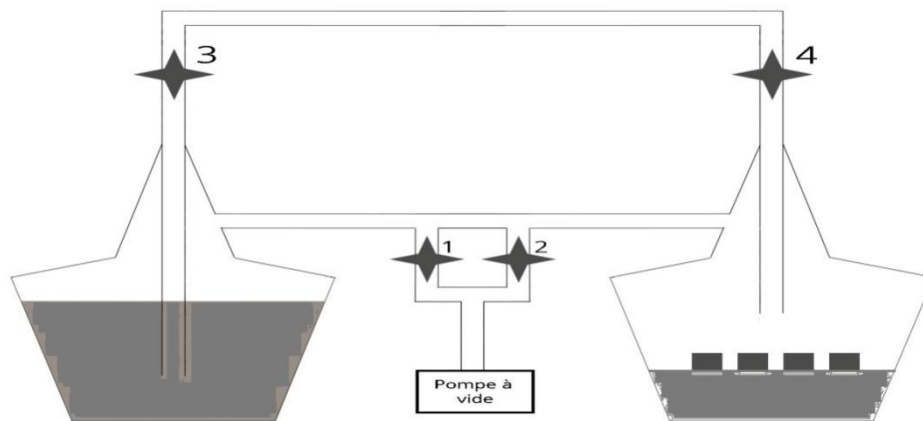
$$\varepsilon = \frac{\text{Volume des pores}}{\text{volume total}} * 100 (\%)$$

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100 (\%) \quad \text{Eq.IV-1}$$

- Masse volumique apparente :

$$\rho = \frac{\text{Masse de l'éprouvette}}{\text{Volume de l'éprouvette}} \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * \rho_{eau} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Eq.IV-2}$$



**Figure IV. 3: Schéma représentant l'essai.**

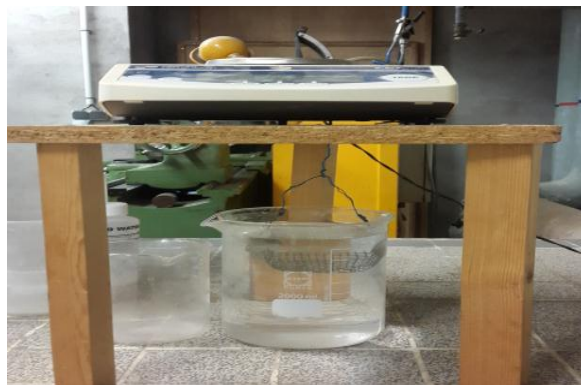
Le mode opératoire de l'essai est le suivant :

1. Placer les éprouvettes dans un dessiccateur et les laisser 4h dans le vide (pression  $P \leq 25$ mbars) ;
2. Remplir d'eau potable le dessiccateur jusqu'au recouvrement des éprouvettes par plus de 2cm d'eau ;
3. Laisser les éprouvettes baigner pendant 44 h en gardant une pression  $P \leq 25$ mbars ;
4. Ramener le dessiccateur à la pression atmosphérique pour pouvoir l'ouvrir ;
5. Peser chacune des éprouvettes dans l'eau ; totalement immergée :  $M_{\text{eau}}$  ;
6. Sortir l'éprouvette de l'eau, l'essuyer rapidement avec un tissu humide et peser dans l'air l'éprouvette humide :  $M_{\text{air}}$  ;
7. Sécher totalement l'éprouvette à  $52^{\circ}\text{C}$  et peser l'éprouvette sèche :  $M_{\text{sec}}$ .

La phase de séchage dure environ 10 jours, ce qui rend l'essai très long. La figure IV.4 présente le matériel nécessaire pour les étapes 1 à 4 (avec le dessiccateur contenant les éprouvettes, le dessiccateur contenant l'eau et la pompe à vide) et la figure IV.5 présente le matériel nécessaire pour l'étape 5 (pesée hydrostatique).



**Figure IV. 4: appareillage à vide**



**Figure IV. 5: matériel de la pesée hydrostatique.**

Remarque :

La norme décrit un séchage à 100°C et non pas 52°C. Cependant, de récentes recherches ont montré que des températures hautes, comme 100°C, modifiaient la microstructure des matériaux cimentaires. Ainsi, pour s'assurer que le séchage n'abîme pas nos éprouvettes, il a été effectué à 52°C.

Le mode opératoire de l'essai de porosité totale accessible à l'eau est décrit avec précision dans l'annexe B.

## **IV.7. Essai imbibition capillaire :**

### **IV.7.1. Principe de la méthode**

La méthode consiste à observer la saturation – prise de masse et montée de la frange capillaire – par absorption capillaire d'un échantillon sec dont la face inférieure est en contact avec un liquide mouillant, l'eau. L'essai est effectué en s'inspirant de la norme NF EN 480-5 [41]. L'eau a une surface libre avec l'air, la pression dans l'eau est donc égale à la pression dans l'air, pression atmosphérique. Par capillarité, l'eau va s'introduire dans la porosité de l'échantillon et progressivement le saturer. Au cours du temps, un suivi de l'évolution de la montée de la frange capillaire et du volume d'eau ayant pénétré dans l'échantillon est réalisé. L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de mortier, dans des conditions spécifiées.

### **IV.7.2. Mode expérimental**

L'essai se déroule dans un bac en plastique contenant environ 5cm d'eau, Le textile utilisé est saturé en eau et placé sur des supports rigides en PVC permettant aux deux extrémités du textile de plonger dans l'eau. (Figure V.6)

Les échantillons sont pesés à l'état sec, avant le début de l'essai (masse de référence pour la détermination de la courbe de prise de masse). À l'instant  $T=0s$ , les échantillons sont placés sur le géotextile.

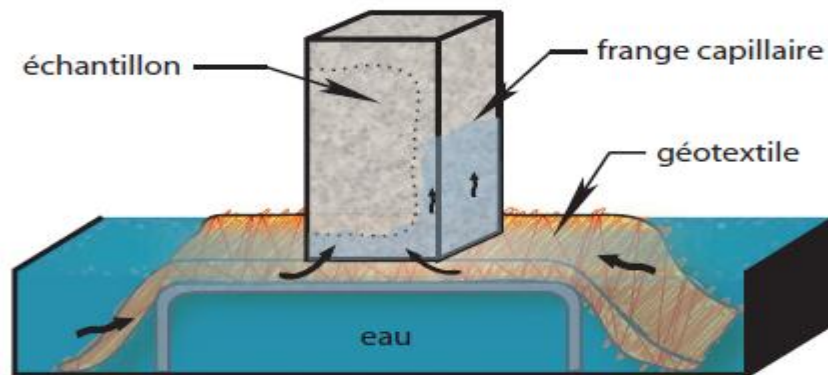
À l'intervalle de temps défini, on procède aux relevés de la frange capillaire et de la masse de l'échantillon en cours d'imbibition. Le relevé de la hauteur de la frange capillaire est effectué à l'aide d'un réglelet métallique plat avec une précision de 0.5 mm sur 8 points de l'éprouvette perpendiculairement à la surface d'imbibition.

La pesée des échantillons s'effectue sur une balance de précision de 0.01g. Lorsque l'échantillon est sorti du bac d'essai, il reste généralement une goutte d'eau n'ayant pas investi le réseau poreux sous l'échantillon. Si l'échantillon était placé directement sur la balance, (de volume et donc de masse variable selon les échantillons), cette goutte serait prise en compte lors de la pesée, c'est pourquoi une éponge saturée en eau est placée sur la balance pour permettre une pesée dans de bonnes conditions en suivant les étapes :

1. On place l'échantillon sur l'éponge et on relève les hauteurs de la frange capillaire ;
2. On tare la balance (remis à 0) ;
3. Lecture, en négatif, de la masse de l'échantillon imprégné lorsque l'échantillon est retiré de la balance.



Cette méthode permet ainsi de retirer la goutte d'eau parasite et la phase pesée permet d'entreposer l'échantillon sur la balance pour effectuer le relevé de la frange capillaire tout en poursuivant le processus d'imbibition capillaire et donc sans risquer le moindre dessèchement.



**Figure IV. 6: Dispositif montrant une absorption capillaire par un échantillon de mortier reposant sur un géotextile [7].**

### IV.7.3. Définitions

Le but de la méthode d'imbibition capillaire est d'observer la pénétration naturelle d'un liquide mouillant, en l'occurrence de l'eau distillée. Les cinétiques d'imbibition capillaire correspondent au coefficient directeur des fonctions suivantes :

$$\frac{\Delta W}{S} = A\sqrt{t} \quad \text{Eq.IV-3}$$

et :

$$h = B\sqrt{t} \quad \text{Eq.IV-4}$$

qui découlent des relation de Washburn (cf Eq.III-15 et Eq.III-16), d'où :

$$A = \frac{r^2 \pi}{S} \sqrt{\frac{r \gamma \cos(\alpha)}{2 \eta}} \quad \text{Eq.IV-5}$$

et :

$$B = \sqrt{\frac{r \gamma \cos(\alpha)}{2 \eta}} \quad \text{Eq.IV-6}$$

avec:

$\Delta w/S$  : la masse d'eau absorbée par unité de surface ( $\text{g/cm}^2$ ) ;

$h$  : la hauteur de la frange capillaire (m) ;

$t$  : le temps (s) ;

$r$  : le rayon capillaire (m).

La théorie et l'ensemble des équations qui s'y rapportent montrent les liens entre les flux hydriques dans les capillaires, le temps et leur dimension :

- La dynamique de l'absorption d'eau dans un capillaire est proportionnelle à la racine carrée du temps ;
- La hauteur de la frange capillaire à l'équilibre est inversement proportionnelle au rayon du capillaire. En d'autres termes, plus les capillaires sont fins, plus la hauteur capillaire de la frange est importante ;
- Le débit dans les capillaires augmente proportionnellement avec la racine carrée de leur rayon. Plus le diamètre du capillaire est important, plus les cinétiques d'absorption d'eau et d'ascension de la frange capillaire sont importantes.

#### **IV.8. Conclusion :**

Les essais réalisés ont permis de collecter différents résultats qu'on interprétera au chapitre suivant qui sera consacré aux traitements des résultats obtenus en traçant des courbes pour montrer l'influence du bio-adjuvant sur l'ouvrabilité et la porosité des bétons.

**Chapitre V : Présentation et interprétation des résultats**

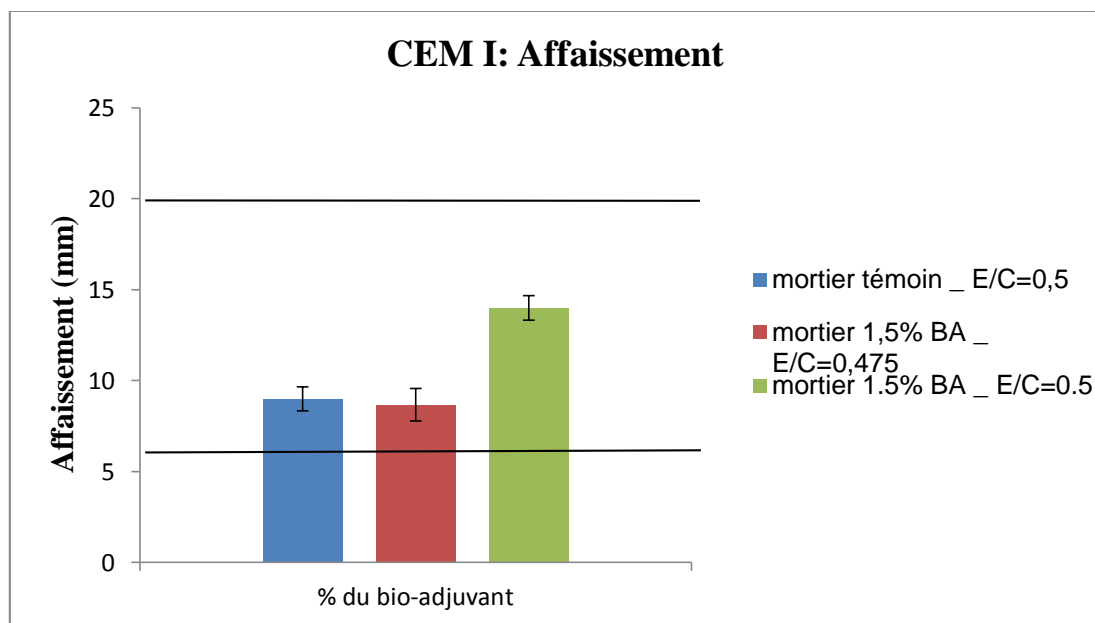
---

### V.1. Introduction :

Ce chapitre propose une présentation des résultats expérimentaux ainsi que leur analyse dans le but d'établir l'influence du bio-adjuvant sur différentes performances de mortiers. Les essais normalisés pourront permettre de confirmer sa capacité à être utilisé comme adjuvant dans des matériaux cimentaires. Malheureusement, vu le délai du stage (4 mois), je n'ai pas pu effectuer tous les essais sur tous les échantillons de mortiers, en effet, l'essai de temps de prise a été effectué que sur les mortiers en CEM I, aussi, en raison du manque du bio-adjuvant, l'essai de caractérisation des plastifiants/réducteurs d'eau n'a été effectué que pour les mortiers en CEM I.

### V.2. Etude de l'ouvrabilité de mortier :

L'ouvrabilité caractérise la facilité de mise en place d'un matériau cimentaire dans un coffrage. Des essais d'affaissement ont été réalisés pour évaluer l'influence du bio-adjuvant sur l'ouvrabilité de mortiers frais à base de ciments CEM I, CEM II et CEM III,



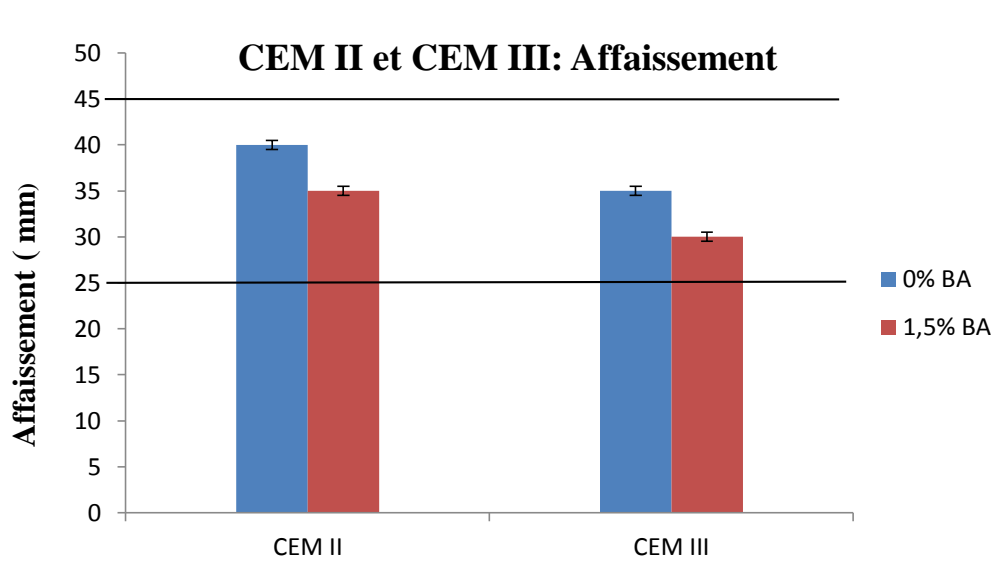
**Figure V. 1: Histogramme des résultats de l'affaissement des échantillons de mortiers CEM I témoins et adjuvés.**

D'après la figure V.1, on observe que le dosage de 1.5% de bio-adjuvant a permis d'atteindre un seuil maximum d'affaissement par rapport au témoin pour les mortiers en CEM I à même rapport E/C ( $E/C = 0.5$ ). Ce résultat laisse supposer que l'incorporation du bio-adjuvant améliore l'ouvrabilité du mortier frais en CEM I.

Afin de considérer le bio-adjuvant comme plastifiant/réducteur d'eau, nous avons diminué 5 % de la quantité d'eau, le rapport E/C est égal à 0,475 [16], les résultats sont comparés avec les résultats du mortier témoin avec un rapport E/C = 0,5. On remarque, que pour un rapport E/C inférieur à 5% par rapport au mortier témoin, on obtient la même consistance, ce résultat nous permet de considérer, d'après la norme 934-2 [37], que le bio-adjuvant est un plastifiant/réducteur d'eau.

D'après [16], les mortiers à base de CEM I, témoins et adjuvantés, avec un rapport E/C égal respectivement à 0.5 et 0.475 ; la classe d'affaissement est la même ; il s'agit de la classe S<sub>1</sub> (cf tableau IV.3 paragraphe IV.4.2).

L'essai d'affaissement au mini-cône a été aussi effectué sur les mortiers en CEM II et CEM III, les résultats obtenus sont représentés dans la figure V.2.

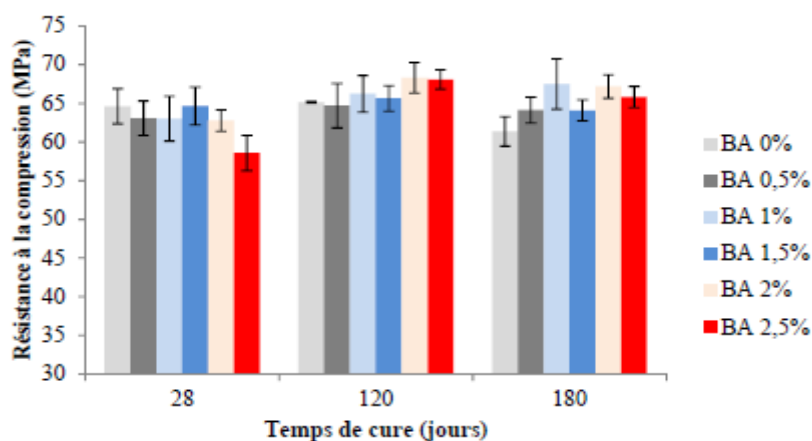


**Figure V. 2: Histogramme des résultats de l'affaissement des échantillons de mortiers CEM II et CEM III témoins et adjuvantés avec un rapport E/C = 0,5.**

On remarque, à partir de la figure V.2, que le bio-adjuvant a diminué le seuil d'affaissement par rapport aux mortiers témoins, néanmoins, le mortier adjuvanté appartient à la même classe d'affaissement que le mortier témoin (les mortiers à base des ciments CEM II et CEM III témoins et bioadjuvantés sont de classe S<sub>2</sub>). Cette observation nous laisse déduire que le bio-adjuvant n'apporte aucune amélioration à l'ouvrabilité des mortiers à base des ciments CEM II et CEM III.

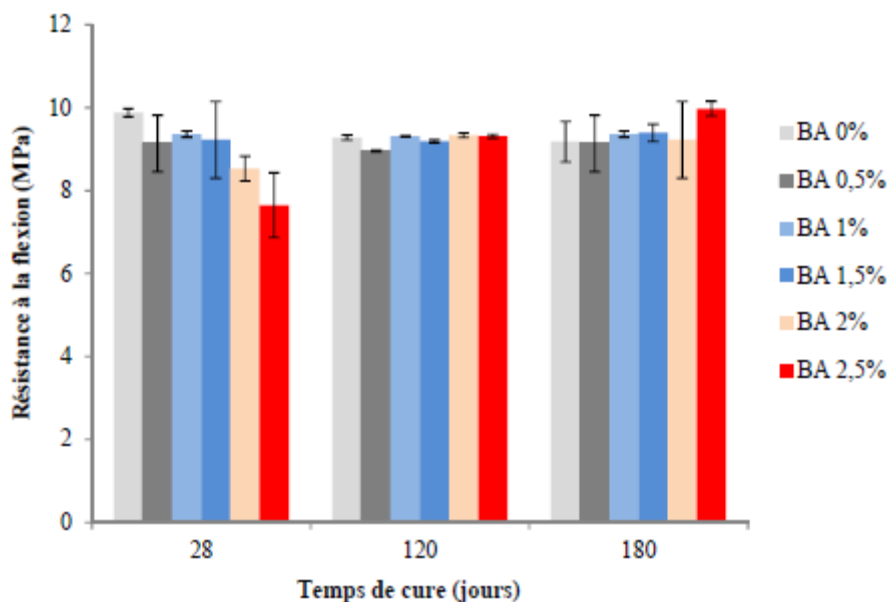
Alors que pour les mortiers à base de ciment CEM I le bio-adjuvant est considéré comme un plastifiant/réducteur d'eau, il ne fut pas le cas pour les mortiers à base de ciments CEM II et CEM III, en effet, la composition chimique des ciments CEM I, CEM II et CEM III est différente (voir tableau IV.1 paragraphe IV.2.1). Bien que le CEM I soit composé majoritairement de clinker et ne contient pas de laitier de haut fourneau, le CEM II et le CEM III contiennent le laitier de haut fourneau. On peut donc constater que le bio-adjuvant ne réagit pas de la même manière avec les laitiers de haut fourneau qu'avec le clinker.

Pour qualifier un adjuvant de plastifiant, la résistance mécanique à la compression et la teneur en air du béton frais doivent également être évaluées, ce qui n'a pas été fait ici car le travail a été focalisé sur la porosité à l'état durci. Ceci dit, les propriétés mécaniques des mortiers bio-adjuvantés à base de CEM I ont déjà été évaluées dans les recherches précédentes, ces dernières ont analysé le bon comportement mécanique des mortiers contenant le bio-adjuvant pour des temps de cure différents.



**Figure V. 3 : Résistance à la compression pour les mortiers à base de CEM I en fonction de la concentration en bio-adjuvant et du temps de cure [35].**

Pour les mortiers de CEM I, la concentration en bioadjuvant ne conduit donc pas au même effet en fonction du temps de cure. Une forte teneur en bioadjuvant permet d'augmenter la résistance mécanique des mortiers pour des temps de cure de 120 et 180 jours, tandis que pour un temps de cure de 28 jours, cette résistance diminue pour une forte concentration en bioadjuvant. Quel que soit le temps de cure, une concentration en bioadjuvant de 1,5% semble toutefois suffisante pour obtenir des résistances du même ordre de grandeur (voir légèrement supérieure à 180 jours) que dans le cas des échantillons non adjuvantés [35].

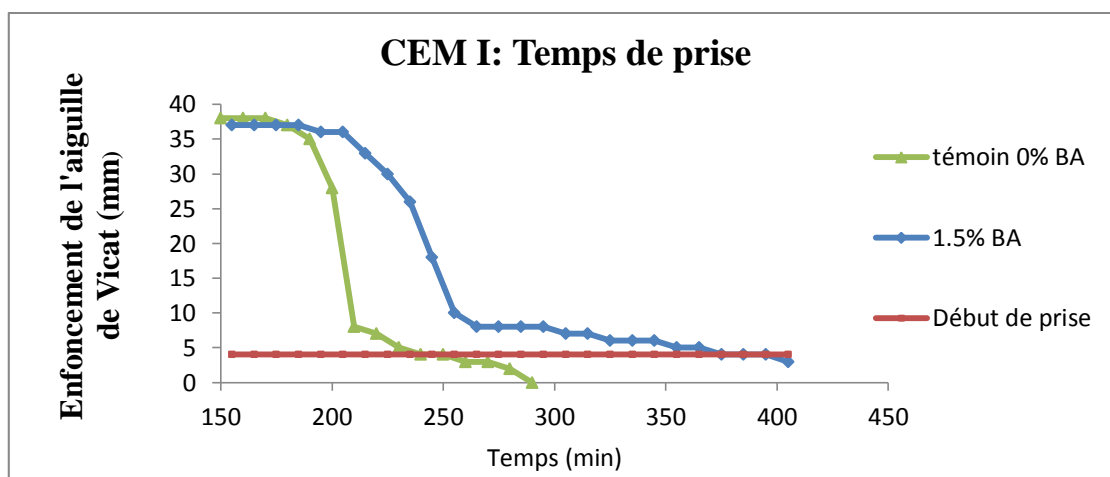


**Figure V. 4 : Résistance à la flexion du mortier à base de CEM I en fonction de la concentration en bio-adjuvant et le temps de cure [35].**

Ces résultats laissent supposer une influence du bioadjuvant par rapport à la résistance à la flexion des mortiers. De fortes concentrations en bioadjuvant dans les mortiers ne sont pas toujours favorables pour améliorer la résistance à la flexion, notamment après 28 jours de cure. Des concentrations en bioadjuvant comprises entre 0,5 et 1,5% offrent cependant des résultats équivalents à ceux obtenus pour le groupe témoin (sans adjuvant), quel que soit le temps de cure [35].

### V.3. Le temps de prise (l'aiguille de Vicat) :

L'essai de temps de prise consiste à lâcher une aiguille verticalement dans un mortier et d'observer sa pénétration. Au début de l'essai, le mortier est frais et l'aiguille s'enfonce totalement. Ensuite, son enfoncement se réduit progressivement, jusqu'à ce que le mortier ait totalement pris. Cette valeur d'enfoncement de l'aiguille est prise à l'intervalle continu. Les mesures ont été prises toutes les 10 minutes ; les points obtenus par l'essai permettent d'aboutir à une courbe. Ce travail a été effectué pour les mortiers en CEM I avec et sans bio-adjuvant. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure V.5.



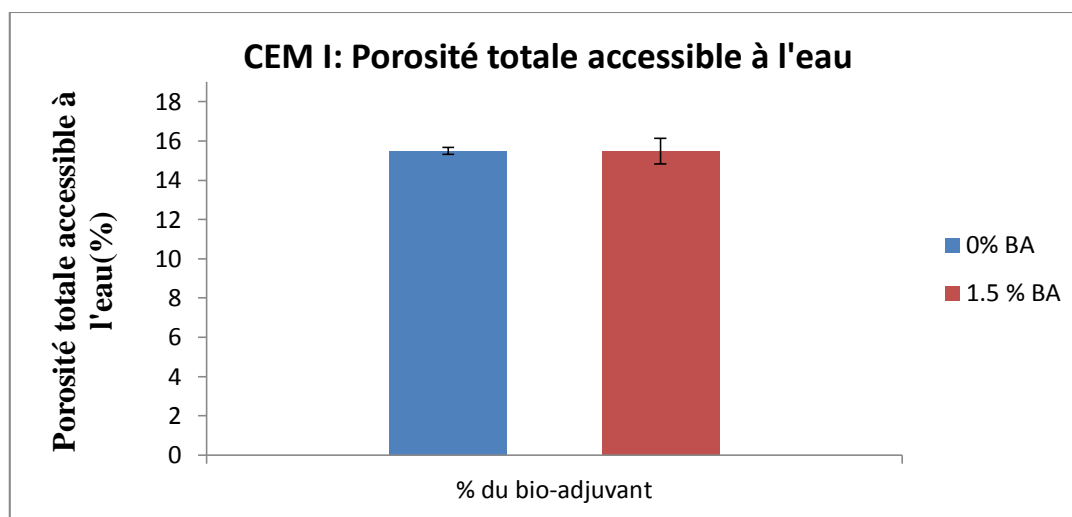
**Figure V. 5: Graphiques représentant l'enfoncement de l'aiguille de Vicat dans un mortier témoin et un mortier adjuvanté avec un rapport E/C = 0,5.**

A partir du graphique de la figure V.5, pour le mortier à base de CEM I contenant 1,5% de bio-adjuvant, un retard de 125 minutes (2 heures et 5 minutes) pour le début de prise est observable. L'incorporation de 1,5% de bio-adjuvant a donc retardé significativement la prise de ciment, on constate alors que ce produit est un retardateur de prise.

#### V.4. Porosité :

##### V.4.1. Porosité totale accessible à l'eau

Les essais de porosité totale accessible à l'eau ont été réalisés sur des mortiers à base de CEM I âgés de 15 jours  $\pm$  2jours, les résultats des essais sont représentés sur la figure V.6 :



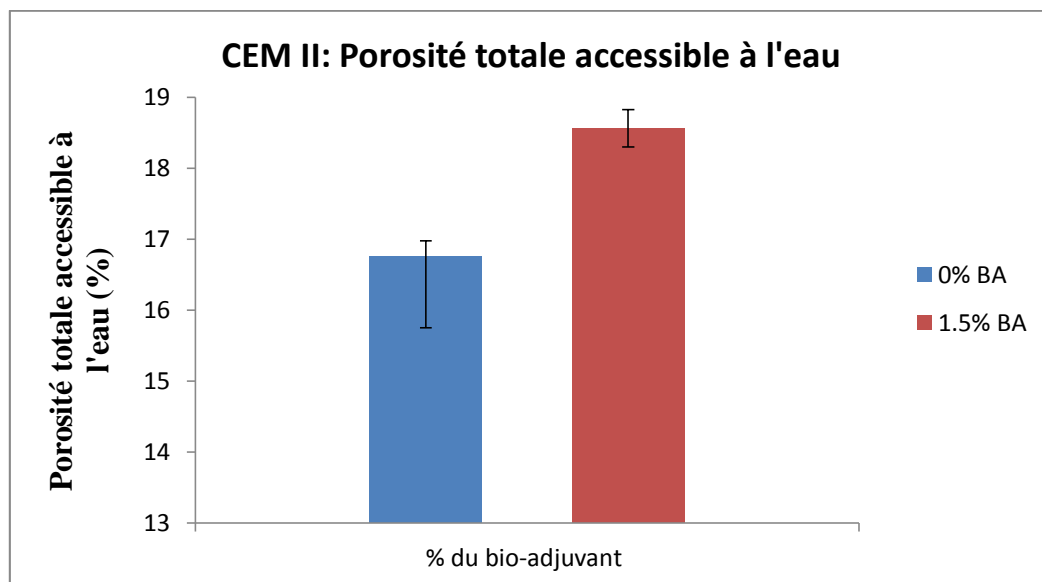
**Figure V. 6: Porosité totale accessible à l'eau de mortier à base de CEM I témoin et adjuvanté.**



Les porosités mesurées à l'eau des mortiers sont comprises dans une fourchette de 14 à 16% (Figure V.6). Ces valeurs restent cependant en accord avec certains résultats de la littérature, où pour des compositions similaires (mortiers à base de CEM I), la porosité est comprise entre 12 et 22% [42], 14 à 22% [43], ou voisine de 17% [44]. Les porosités à l'eau obtenues apparaissent donc cohérentes pour les mortiers par rapport à la littérature.

Les mortiers avec et sans bio-adjuvant ont des taux de porosité équivalents. Après 15 jours de cure, la porosité moyenne des mortiers témoins est de 15.5% et celle des mortiers adjuvantés est de 15.5%. En d'autres termes, le bio-adjuvant ne semble influencer la porosité totale accessible à l'eau des mortiers. Ce résultat ne fait que confirmer les résultats obtenus dans les recherches précédentes [35].

Les essais de porosité totale accessible à l'eau ont aussi été réalisés sur des mortiers à base de CEM II âgés de 15 jours  $\pm$  2 jours, les résultats obtenus sont représentés dans la figure V.7 :

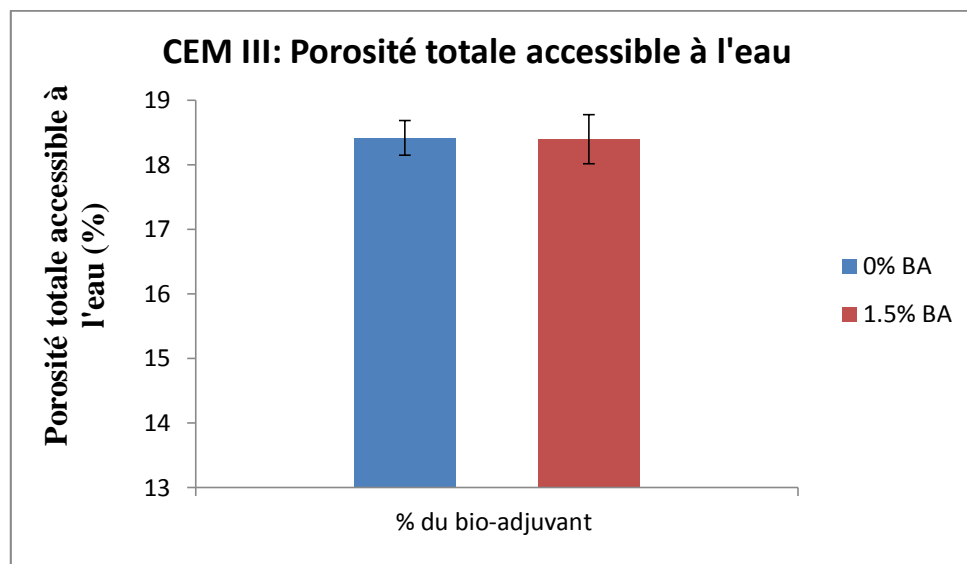


**Figure V. 7: Porosité totale accessible à l'eau de mortier à base de CEM II témoin et adjuvanté.**

Les pourcentages de la porosité totale accessible à l'eau varient de 16 à 19%, ces valeurs restent cohérentes avec la littérature. Cependant, on remarque que la tendance s'est inversée pour les mortiers à base de CEM II, en effet, il est clair (figure V.7) que la porosité des mortiers adjuvantés est supérieure à celle des mortiers témoins. Le bio-adjuvant a un effet étrange sur les mortiers à base de CEM II, la moyenne de la porosité des mortiers témoins étant de 16,8%, celle des mortiers adjuvantés est de 18,6%. Le bio-adjuvant apporte donc une augmentation considérable de la porosité avec un dosage de 1,5% (augmentation de 10.8% de

la porosité en présence du bio-adjuvant). Etant donné que l'essai a été mené une seule fois sur les échantillons, un problème est peut être survenu lors de l'essai, à cause du délai de stage et la durée de l'essai (15 jours de cure et 15 jours de l'essai) je n'ai pas pu effectuer un second essai afin de, soit confirmer les résultats obtenus ou au contraire, me rendre compte que je me suis trompée. Ce résultat étant incertain, la valeur obtenue pour les CEM II ne sera pas prise en compte dans le reste de l'analyse.

Sur le mortier à base de CEM III âgés de 77 jours  $\pm$  4 jours, les résultats obtenus par l'essai de porosité totale accessible à l'eau sont représentés dans la figure V.8 :

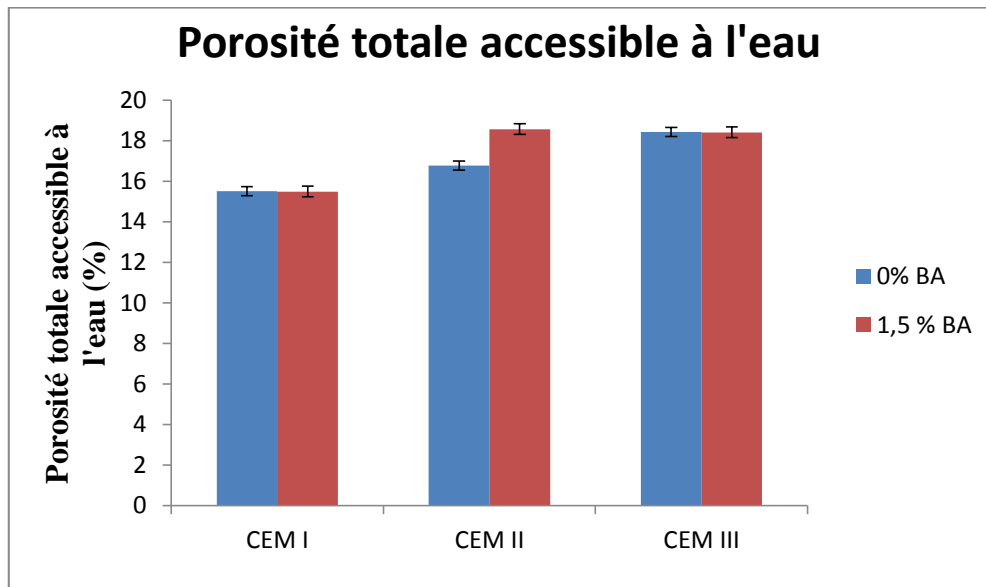


**Figure V. 8: Moyenne de la porosité totale accessible à l'eau des échantillons de mortiers à base de CEM III témoins et adjuvés avec l'écart type.**

Les valeurs obtenues pour cet essai restent cohérentes avec la littérature (pourcentages de la porosité totale accessible à l'eau compris entre 17 et 19%). On observe à partir des histogrammes de la figure V.8 que le dosage de 1.5% de bio-adjuvant n'influence pas tellement la porosité des mortiers. Le bio-adjuvant incorporé aux mortiers à base de CEM III n'influence pas leur structure poreuse.

Influence de la nuance cimentaire sur la porosité totale accessible à l'eau :

On propose maintenant, à partir de la figure V.9, un résumé des résultats obtenus de la porosité totale accessible à l'eau à base de CEM I, CEM II et CEM III, témoins et adjuvants.



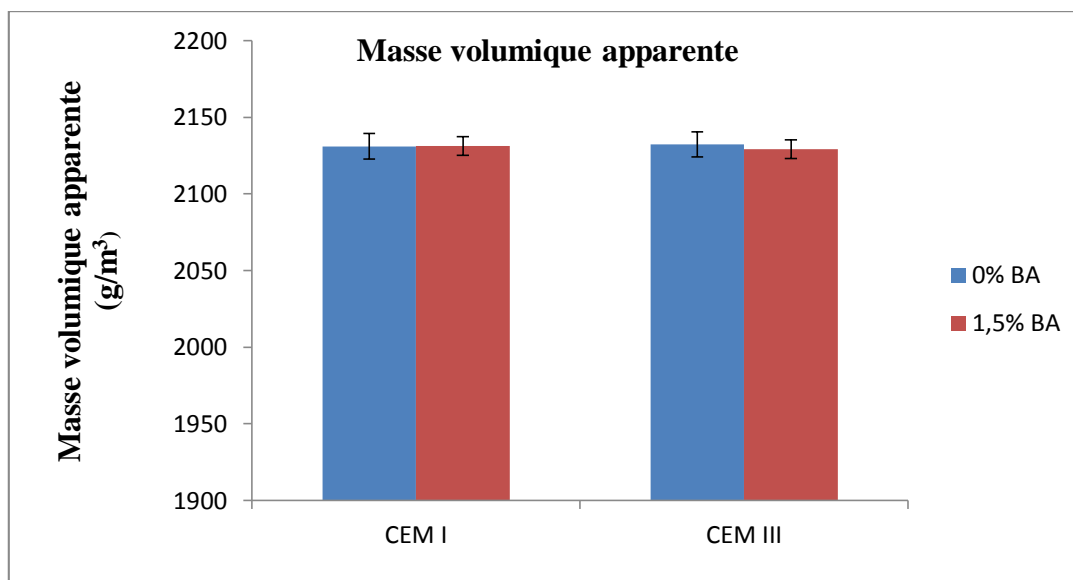
**Figure V. 9: Porosité totale accessible à l'eau des différents mortiers étudiés.**

Selon la littérature, la porosité accessible à l'eau d'un mortier normalisé, avec un rapport E/C de 0.5 est comprise entre 15 et 24% en fonction du ciment utilisé [35]. Cette observation permet de s'assurer de la fiabilité des résultats.

Ainsi, Les résultats obtenus pour les mortiers à base de CEM I ne font que confirmer les résultats des recherches précédentes [35] et [7]. La structure poreuse des mortiers à base de CEM I est considérablement plus faible que celle des mortiers à base de CEM II et CEM III, on constate alors que la présence des laitiers de haut fourneau modifie la structure poreuse des matériaux cimentaires en augmentant la porosité.

### V.4.2. Masse volumique apparente

L'essai de porosité permet également de déterminer la masse volumique apparente du mortier durci. La figure V.10 représente la moyenne de la masse volumique des échantillons de mortiers à base de CEM I et CEM III témoins et adjuvés.



**Figure V. 10: Moyenne de la masse volumique apparente des échantillons de mortiers à base de CEM I et CEM III témoins et adjuvés avec l'écart type.**

En observant l'histogramme de la figure VI.10, on remarque que la masse volumique apparente des mortiers à base de CEM I et de CEM III contenant le bio-adjuvant ne varie pas de manière significative. Ce produit n'apporte donc pas une modification à la structure physique.

Les paramètres mis en évidence alors dans cet essai sont la porosité totale accessible à l'eau et la masse volumique apparente du mortier durci. Cependant, les adjuvants sont caractérisés dans la norme NF EN 934-2 selon leur teneur en air dans le béton frais. Le tableau V.1 liste les différences entre la teneur en air et la porosité.

**Tableau V. 1 : Tableau comparatif de la teneur en air et la porosité**

	Teneur en air	Porosité
Matériau utilisé pour le test	Béton	Mortier
Etat du matériau	Etat frais	Etat durci
Formule	$V_{\text{air}} / V_{\text{total}}$	$V_{\text{vide}} / V_{\text{total}}$

La différence entre la teneur en air du béton frais et la porosité totale accessible à l'eau du mortier durci est telle qu'il est impossible de dire si un mortier répond, ou non, à la norme adjuvant NF EN 934-2, avec uniquement les résultats de l'essai de porosité. Il est donc pas possible de considérer le bioadjuvant en tant qu'entraîneur d'air ou pas.

### V.5. Imbibition capillaire :

La porosité d'un matériau ainsi que la distribution du volume poreux sur l'échelle des tailles de pores, ne constituent pas des indicateurs suffisants pour estimer ses propriétés de transport de fluides à travers l'espace poreux. Le degré d'interconnexions des pores entre eux, le rôle des différentes classes de taille dans la connexion sont également des facteurs déterminants. L'essai de porosité ne permet pas de déterminer totalement le degré de connexion, car ce dernier est fortement lié à l'organisation spatiale de la porosité. C'est la raison pour laquelle l'essai d'imbibition capillaire apporte une information supplémentaire indispensable à l'analyse des propriétés de transfert hydrique dans le mortier. La capillarité est une caractéristique relative à l'absorption d'un liquide dans un matériau poreux.

L'imbibition capillaire caractérise le déplacement d'un fluide dans un échantillon. Les essais d'imbibition capillaire sont réalisés selon la norme EN 480-5 [41]. Les résultats présentés ici sont les résultats normalisés par rapport à la surface d'imbibition et à la masse d'imbibition.

Les caractéristiques géométriques et l'âge des échantillons de mortiers sont représentés dans le tableau V.1.

**Tableau V. 2: Caractéristiques des échantillons utilisés pour les essais d'imbibition capillaire.**

	Surface d'imbibition (mm <sup>2</sup> )	Hauteur moyenne (mm)	Age (jours)
CEM I	8	38	91 ± 1
CEM I	25	50	40 ± 2
CEM II	25	50	42 ± 2
CEM III	8	38	123 ± 1

### V.5.1. Prise de masse

Les figures VI.11 à VI.14 représentent respectivement les prises de masses pour les échantillons en CEM I ( $50*50*50 \text{ mm}^3$ ), CEM I ( $40*40*20 \text{ mm}^3$ ), CEM II ( $50*50*50 \text{ mm}^3$ ) et CEM III ( $40*40*20 \text{ mm}^3$ ) en fonction de la racine carrée du temps. Les résultats présentés sont normalisés par rapport à la surface d'imbibition et par rapport à la masse initiale des différents échantillons.

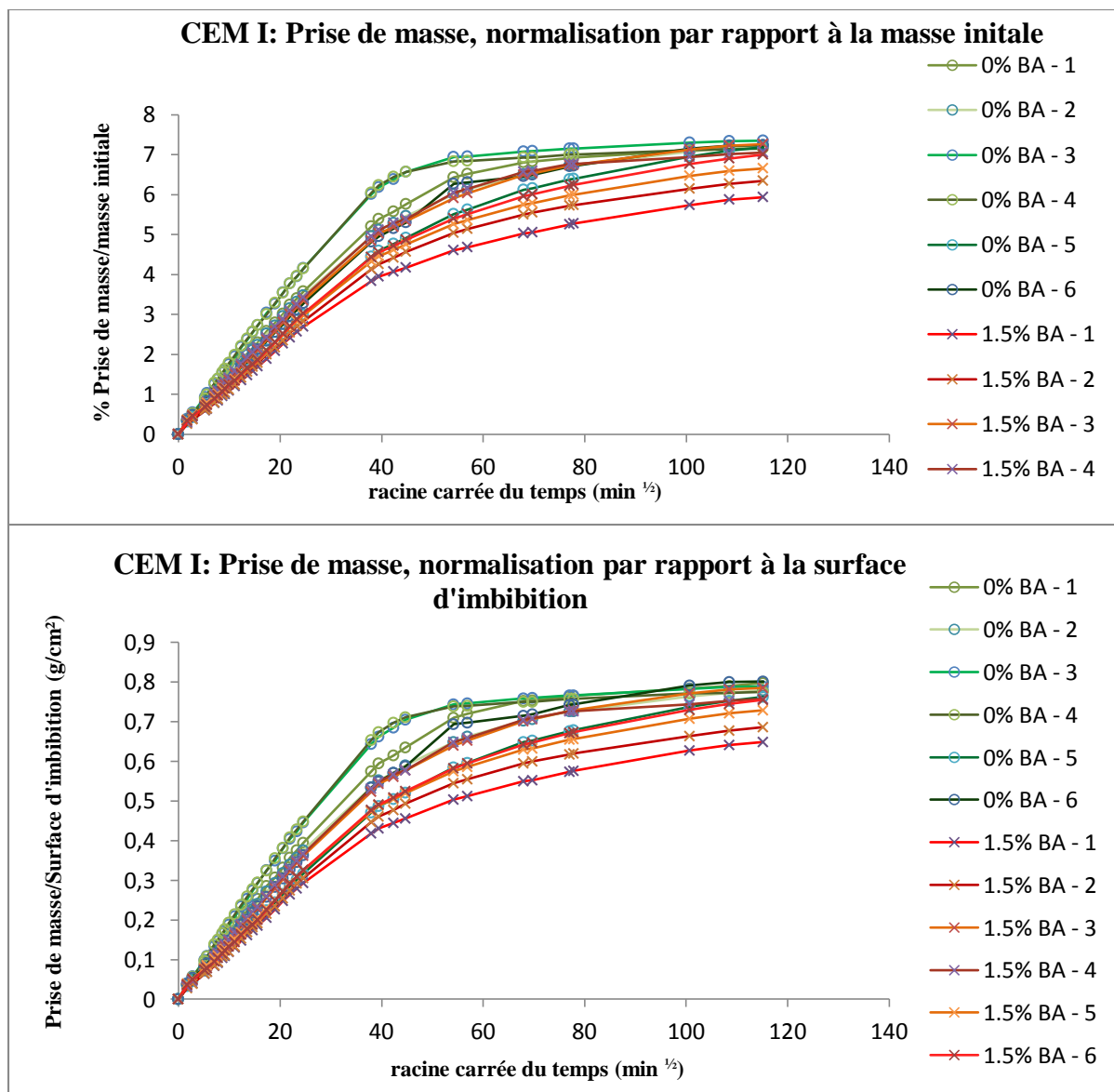


Figure V. 11: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM I témoins et adjuvés (surface d'imbibition  $25\text{mm}^2$ ).

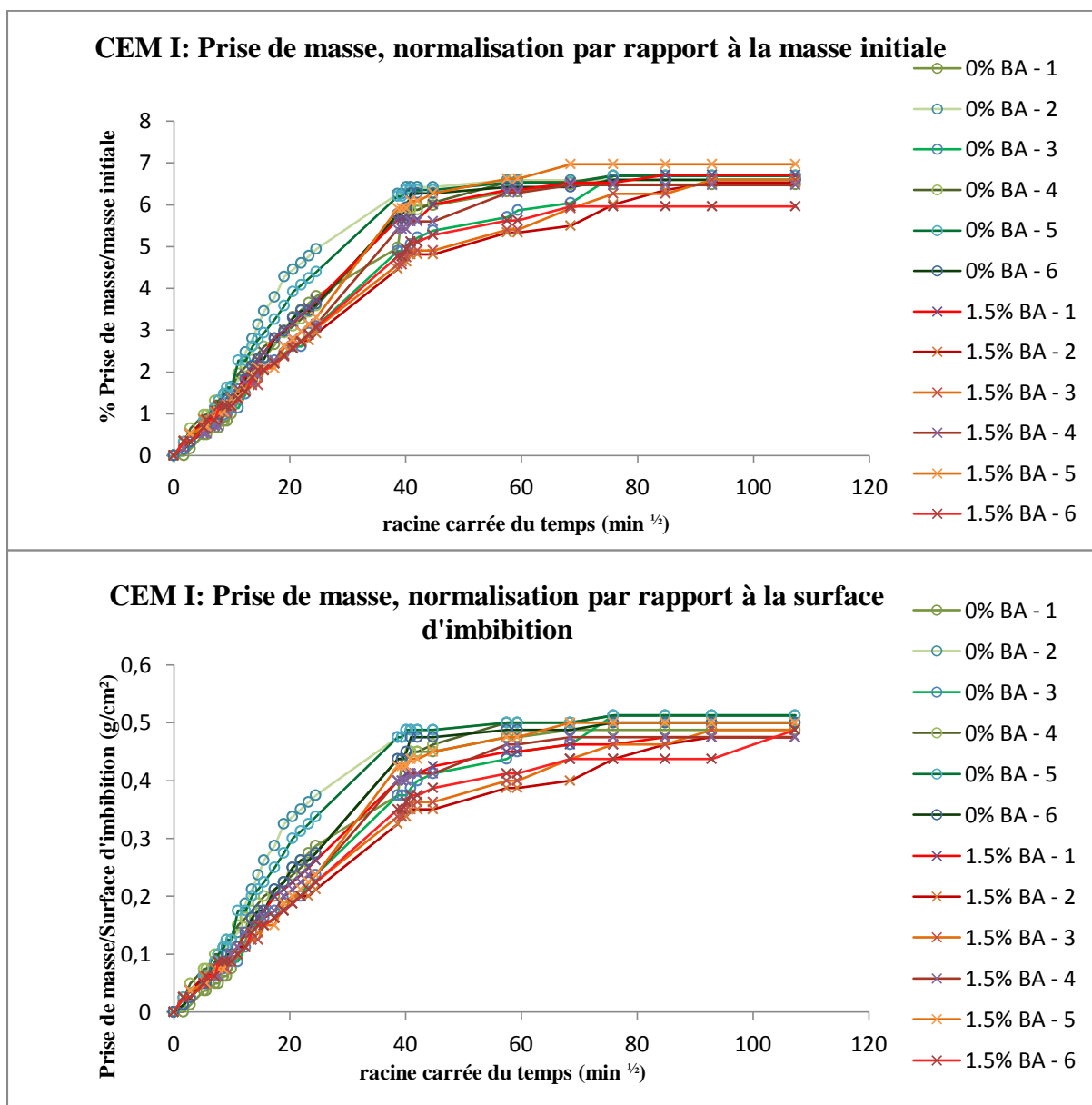


Figure V. 12: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM I témoins et adjuvantés (surface d'imbibition 8mm<sup>2</sup>).

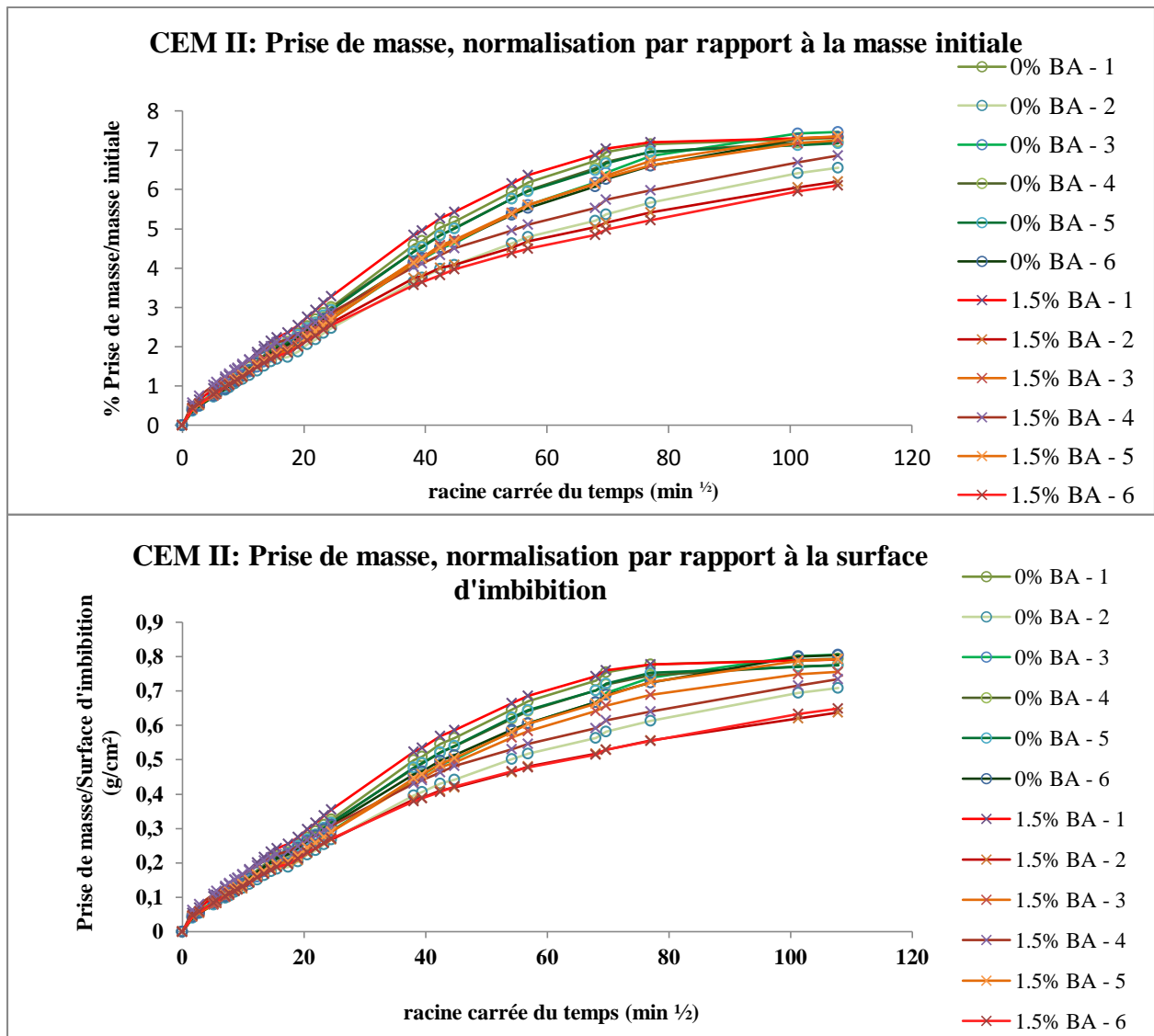


Figure V. 13: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM II témoins et adjuvés (surface d'imbibition 25mm<sup>2</sup>).



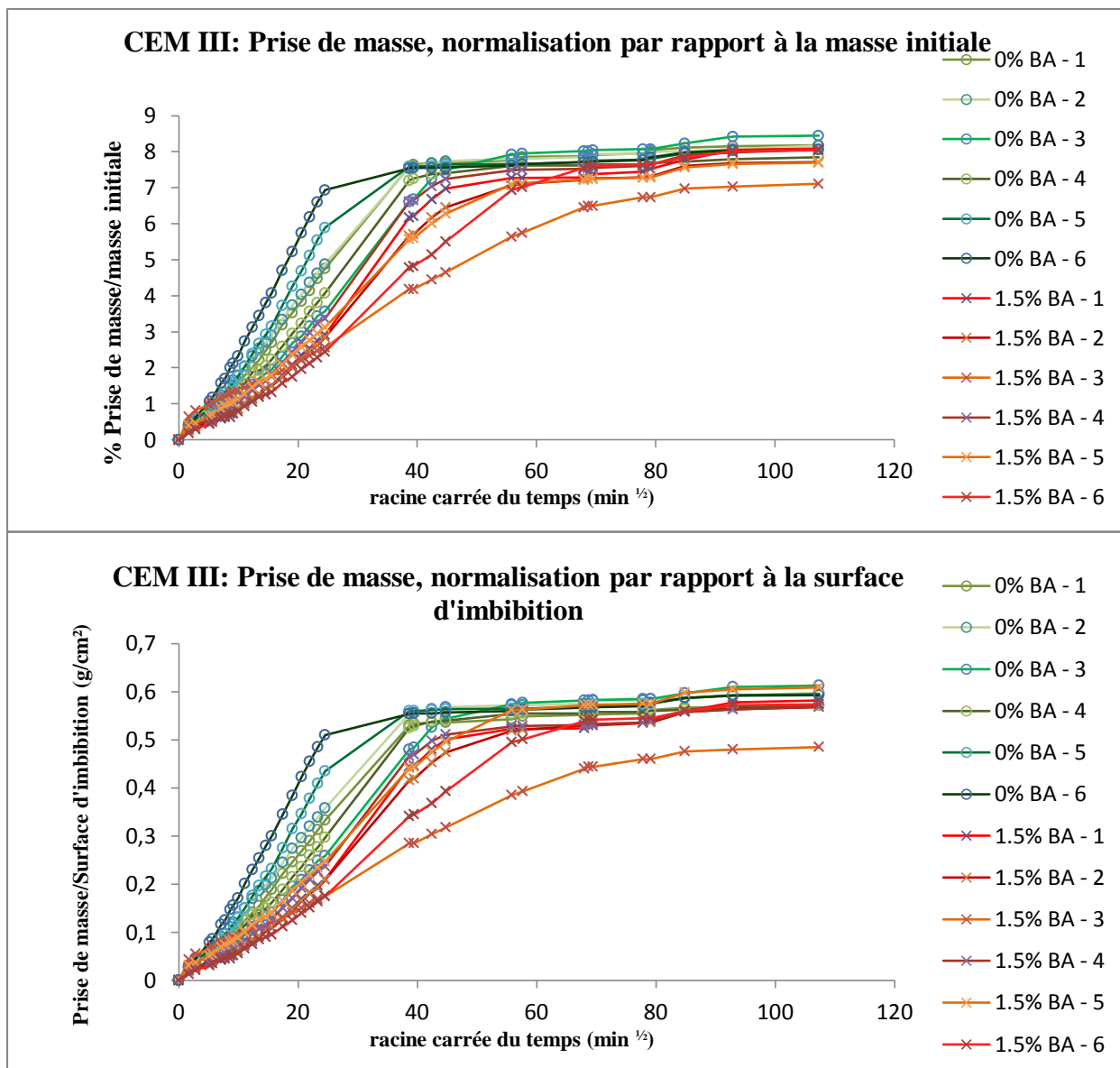


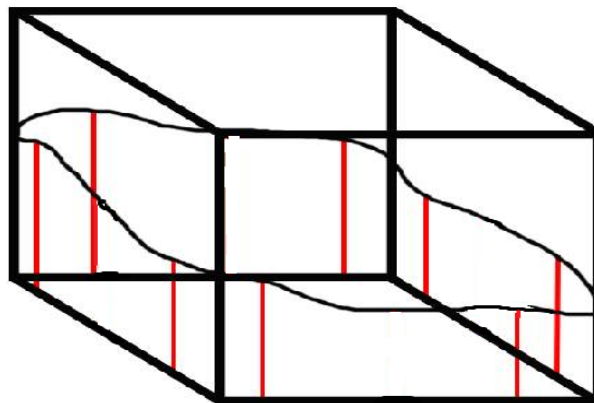
Figure V. 14: Essai d'imbibition capillaire : Prise de masse des échantillons de CEM III témoins et adjuvantés (surface d'imbibition 8mm<sup>2</sup>).

Observations :

- Le tracé de relevés de masse des imbibitions capillaires montre que l'absorption d'eau dans le mortier n'est pas influencée par la présence du bio-adjuvant.
- Une relation linéaire s'établit entre la quantité d'eau absorbée et le temps, jusqu'à environ 625 minutes. La variation de poids par unité de surface d'imbibition ( $\Delta M/S$  en g/cm<sup>2</sup>) se décompose en deux phases en fonction du temps :
  - Au début de l'essai (jusqu'à 625 minutes), il y a saturation de la porosité libre ; la vitesse d'absorption est plus élevée ;
  - Après 625 minutes d'essai, les porosités capillaires sont de plus en plus fines ; la vitesse d'absorption est donc plus faible. Cette allure illustre le remplissage des capillaires de diamètres plus fins jusqu'à saturation totale.

### V.5.2. Montée capillaire

Les mesures de la hauteur de la frange capillaire ont été prises pour les quatre faces de l'échantillon, pour chaque face, puisque nous avons remarqué que cette hauteur n'est pas homogène sur les faces de l'échantillon. La figure V.15 montre comment nous avons procédé à ces mesures sur les échantillons de mortier.



**Figure V. 15 : Schéma explicatif des mesures de la montée capillaire d'un échantillon de mortier.**

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats d'un seul échantillon de mortier témoin et un échantillon bio-adjuvanté pour chaque nuance cimentaire. Pour chaque échantillon, nous avons relevé huit mesures de la hauteur de la frange capillaire comme expliqué dans la figure V.15. Les résultats des autres échantillons sont représentés dans l'annexe C.

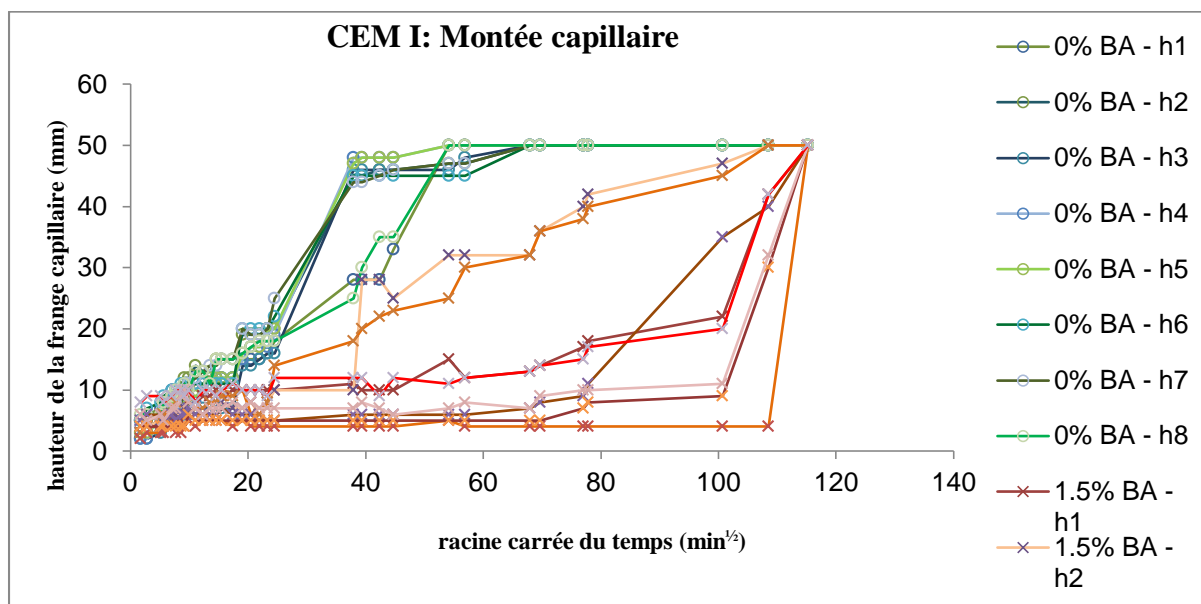


Figure V. 16: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM I témoins et adjuvantés (50\*50\*50 mm<sup>3</sup>).

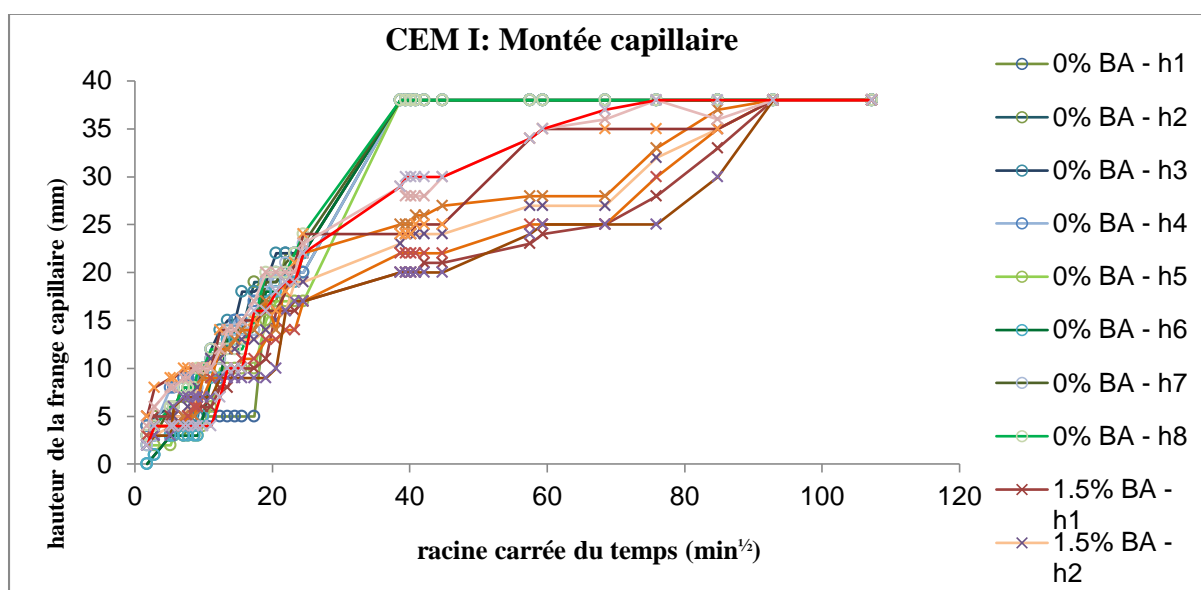


Figure V. 17: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM I témoins et adjuvantés (40\*40\*20 mm<sup>3</sup>).

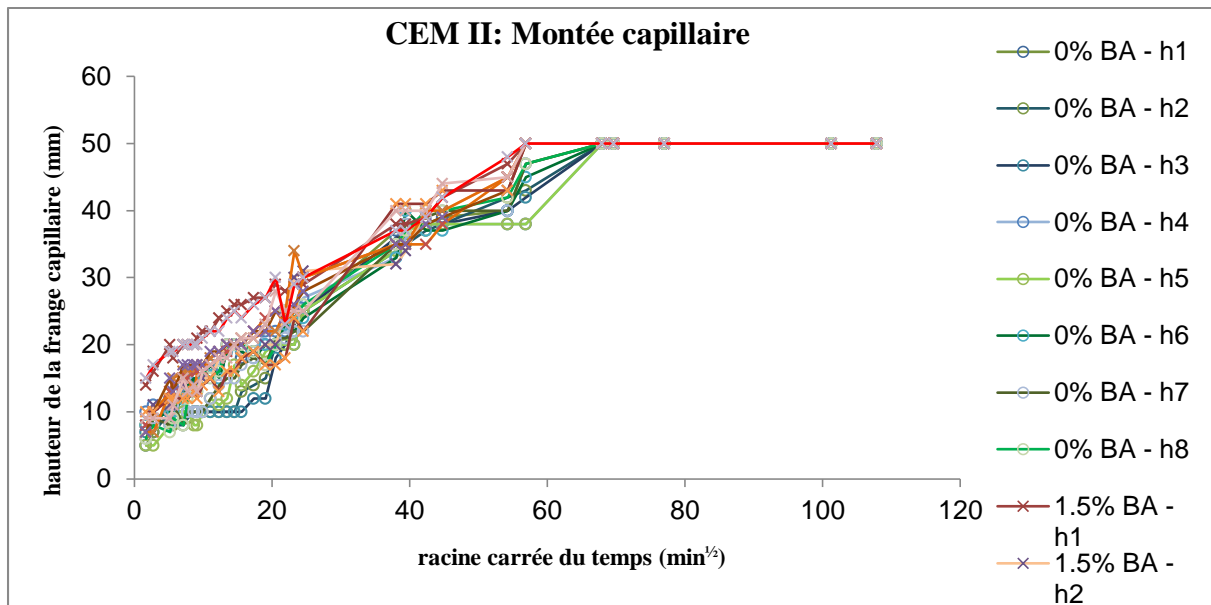


Figure V. 18: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM II témoins et adjuvantés ( $50*50*50 \text{ mm}^3$ ).

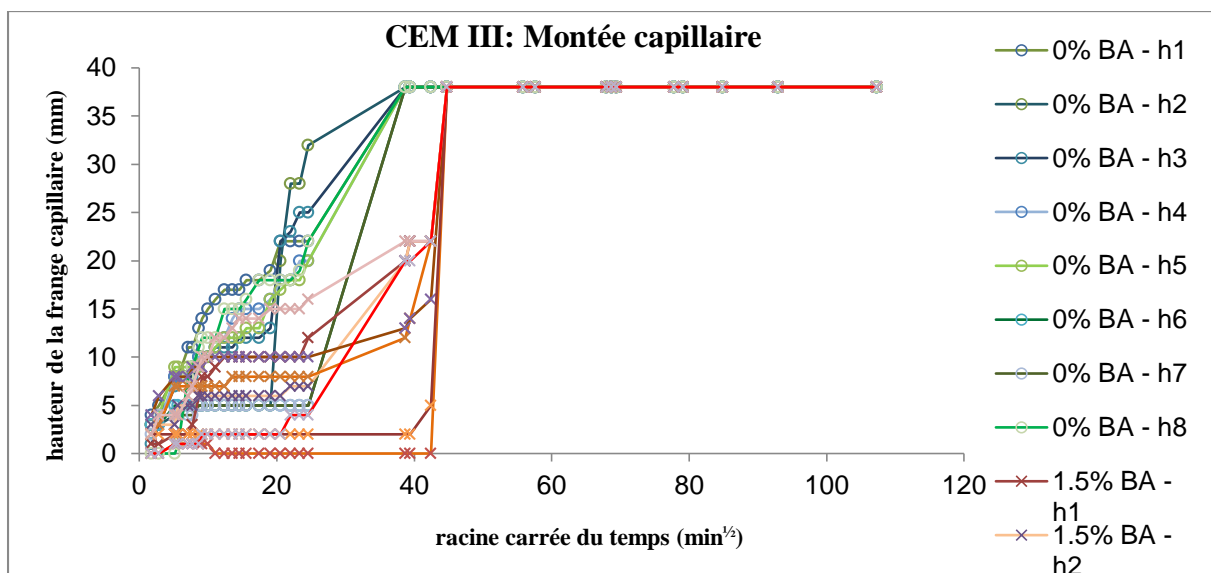


Figure V. 19: Essais d'imbibition capillaire : Évolution de la hauteur de la frange capillaire des échantillons de CEM III témoins et adjuvantés ( $40*40*20 \text{ mm}^3$ ).

Observations :

Ces essais ont mis en évidence que :

✓ Pour les CEM I :

- Les différentes faces d'un échantillon de mortier adjuvanté ou non, présentent des comportements globalement identiques ;
- La montée capillaire des échantillons de mortiers non adjuvantés atteint la saturation bien avant les mortiers adjuvantés à base de CEM I ; on peut dire alors que le bio-adjuvant augmente la résistance d'infiltration du fluide par la surface de peau (surface coffrée);
- La surface d'imbibition capillaire n'influence pas le comportement capillaire des échantillons de mortiers à base de CEM I. En effet, le graphe de la figure V.16 représente la montée capillaire des échantillons de mortier à base de CEM I d'une surface d'imbibition de 25 mm<sup>2</sup> et la figure VI.17 présente la montée capillaire des échantillons de mortier à base de CEM I d'une surface d'imbibition de 8 mm<sup>2</sup>. Cependant, on remarque que les mortiers ayant une surface d'imbibition plus petite (8 mm<sup>2</sup>) atteignent la saturation plus rapidement que les mortiers ayant une surface d'imbibition plus importante (25 mm<sup>2</sup>) ;
- Il faut noter que toutes les faces des échantillons sont des surfaces de peau (surfaces coffrées, surfaces inférieures du coffrage) car nous n'avons pas découpé les échantillons de mortiers. On remarque, qu'il y a stabilisation de la hauteur et puis d'un coup une augmentation de cette dernière. Ceci s'explique par le fait que, lorsque le fluide n'arrive pas à pénétrer la surface coffrée de l'échantillon, il infiltre alors le cœur de l'échantillon ensuite il trouve un autre chemin pour infiltrer la surface de peau.

✓ Pour les CEM II :

- Les échantillons de mortiers à base de CEM II témoin et bio-adjuvanté présentent des montées capillaires comparables, en effet, l'échantillon bio-adjuvanté atteint la saturation en même temps que l'échantillon non adjuvanté, le bio-adjuvant n'empêche pas l'eau de pénétrer par la surface de peau pour cette nuance cimentaire.

- ✓ Pour les CEM III :
  - Comme pour le mortier à base de CEM I, l'échantillon non adjuvanté atteint la saturation avant l'échantillon bio-adjuvanté ;
  - La stabilisation de la hauteur de la frange capillaire s'explique par le fait que, lorsque le fluide n'arrive pas à infiltrer la surface de peau (surface coffrée), il infiltre d'abord le cœur de l'échantillon ensuite il trouve un autre chemin pour infiltrer la surface de peau.

## V.6. Conclusion :

Les résultats obtenus ont montré que :

- Le bio-adjuvant joue un rôle de plastifiant/réducteur d'eau pour les mortiers à base de CEM I, cependant, il n'apporte aucune modification à l'ouvrabilité des mortiers à base de CEM II et CEM III ;
- Le bio-adjuvant est un retardateur de prise pour les mortiers à base de CEM I;
- L'incorporation du bio-adjuvant dans les mortiers à base de CEM I et CEM III ne modifie pas la structure poreuse des mortiers. En effet, la porosité totale accessible à l'eau est pratiquement la même pour les mortiers témoins et adjuvantés ;
- La présence du bio-adjuvant dans le mortier empêche plus l'eau à s'infiltrer que le mortier témoin, la cinétique d'imbibition du mortier à base de CEM I et CEM III est influencée par la présence du bio-adjuvant. Mais pour les mortiers à base de CEM II, le bio-adjuvant n'apporte aucune modification pour la cinétique d'imbibition capillaire, les résultats obtenus pour les mortiers témoins et adjuvantés sont pratiquement identiques.

## **Conclusion générale et perspectives**

Ce travail a pour but de caractériser l'influence d'un bio-adjuvant (dont le principe actif est constitué d'exo-produit bactériens) sur les différentes caractéristiques physico-chimiques (ouvrabilité, temps de prise, porosité, masse volumique et imbibition capillaire) de mortiers. Il a été motivé par les considérations environnementales et les problématiques de développement durable, afin d'élaborer des adjuvants respectueux de l'environnement, pouvant se substituer à des produits soumis à autorisation REACH, permettant d'élaborer des bétons plus éco-respectueux.

Les résultats de ce travail ne concernent pas la bioreceptivité de manière directe, mais il faut noter que, l'analyse des effets de modification de surface du mortier permet de mettre en évidence une potentielle amélioration à la biodétérioration des bétons bio-adjuvantés puisqu'une diminution de la porosité peut augmenter la résistance à la pénétration d'éléments agressifs via l'eau.

L'action du produit biologique a été évaluée aussi bien sur sa capacité d'améliorer le réseau poreux des mortiers, que sur ses effets sur le temps de prise et la rhéologie à l'état frais permettant ainsi de qualifier ce produit en tant qu'adjuvant.

Le bio-adjuvant dosé à 1,5% du poids du ciment a présenté une amélioration notable des mortiers à base de CEM I avec une action plastifiante ; permettant de réduire d'au moins 5% de la quantité d'eau, à affaissement constant, cependant, pour les mortiers à base de CEM II et CEM III le bio-adjuvant n'a apporté aucune amélioration à l'ouvrabilité.

Nous avons constaté, à partir de l'essai de temps de prise (aiguille de Vicat), que le bio-adjuvant est un retardateur de prise pour le CEM I et un dosage de 1,5%.

L'incorporation du bio-adjuvant dans le mortier n'influence pas la porosité totale accessible à l'eau pour les mortiers à base de CEM I et CEM III.

Des essais d'imbibition capillaire ont été réalisés pour évaluer l'effet potentiel du bio-adjuvant sur la pénétration de l'eau dans les mortiers. On a constaté à partir des résultats obtenus que le bio-adjuvant influence la cinétique d'imbibition des mortiers à base de CEM I et CEM III, en effet, l'infiltration de l'eau dans le mortier bio-adjuvanté se fait beaucoup plus lentement que pour le mortier non adjuvanté. Cependant, il a déjà été constaté, dans les recherches précédentes, que le bio-adjuvant améliore la porosité et la cinétique d'imbibition des pâtes de ciment, et que pour un seuil de concentration de bio-adjuvant, la structure du



réseau poreux des matériaux cimentaires permettant la pénétration des agents extérieurs (agressifs ou non) est modifié par le bio-adjuvant.

Cependant il est à noter que les résultats obtenus à partir des essais réalisés sur les mortiers à base de CEM II ont montré que l'incorporation du bio-adjuvant a permis d'augmenter significativement la porosité totale accessible à l'eau. De ce fait, des recherches plus approfondies sur cette nuance cimentaire devront être effectuées afin d'évaluer l'influence du bio-adjuvant sur les caractéristiques physico-chimiques de cette dernière.

D'autres perspectives à ce travail peuvent être envisagée, telle l'étude des effets des combinaisons du bio-adjuvant avec d'autres produits (agents de viscosité, agents entraîneur d'air...), dans la limite des 5% imposés par la norme NF EN 934-2 sur le comportement de bétons et les éventuelles modifications de l'ouvrabilité, des résistances mécaniques ou d'autres paramètres (porosité, rugosité...).

## Références bibliographique

- [1] ROUX Sébastien. Evaluation des risques de biodégradation des bétons en contact avec une eau douce naturelle. Thèse de doctorat d'université. Strasbourg : INSA de Strasbourg et université Louis Pasteur, 2008, 222 p.
- [2] CIMbéton, 2005. Les constituants des mortiers et des bétons. Tome 1. (Chapitre 2.2) (en ligne en format PDF). Collection Technique Cimbéton T 47. Edition septembre 2005.
- [3] PERTUE Arnaud. Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âge. Thèse de doctorat d'Université. Nantes : Université de Nantes, 2008, p205.
- [4] PIGEON, Composition et hydratation du ciment Portland, Séminaire progrès dans le domaine du béton, Québec, septembre 1981, p. 36-72.
- [5] OLLIVIER, Jean-Pierre et VICHOT, Angélique. La Durabilité Des Bétons : Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2008. 868p.
- [6] Zeghichi, L. Etude des liants et bétons à base des alcalis et ciments au laitier. Thèse de magister. Biskra : Université de Biskra, 1998, 120 p.
- [7] BUR Nicolas. Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable. Thèse de doctorat d'Université. Strasbourg : INSA de Strasbourg, 2012, 219p.
- [8] Dreux, G. et Festa, J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, huitième édition. 1998, Paris: Eyrolles. 409.
- [9] Lea, F.M. 1971. The chemistry of cement and concrete. First American edition, New York, 727 p.
- [10] SKENDER Zakaria. Durabilité des bétons à base de sable de concassage. Thèse de magister. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2009, 79 p.
- [11] NACHBAUR L., MUTIN J.-C., NONAT A., CHOPLIN L.-« Dynamic mode rhéologie of cement and tricalcium silicate pastes from mixing to setting ». Cement and Concrete Reaserch, Vol.31, n°2, 2001, p. 183-192.

- [12] Thierry Chaussadent, Véronique Baroghel-Bouny, Nouredine Rafaï, Abdelkrim Ammouche & Hugues Hornain (2001) Influence du rapport E/C sur l'hydratation, la microstructure et les déformations endogènes de pâtes de ciment durcies, *Revue Française de Génie Civil*, 5:2-3, 217-23.
- [13] MEHTA P.K. *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall, inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1986,450 p.
- [14] Hu chong. *Rhéologie des bétons fluides*. Thèse de doctorat. Paris : Ecole nationale des ponts et chaussées, 1995, 201p.
- [15] Bombléd, J.P., *Rhéologie du Béton frais*, Publication Technique N°161, C.E.R.I.L.H, Paris, 1964.
- [16] A.SCWARTZENTRUBER, C.CATHRINE, 1999. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)- un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvés. In : *Matériaux et construction*. Ed. Jason Weiss, octobre 2000, volume 33, n°232, p. 475-482, ISSN: 1359-5997.
- [17] Giorgio Montaudo, Robert Lattimer.. «Mass spectrometry of polymers » CRC Press LLC, 2002.
- [21] CIMbéton, 2006. Mise en œuvre sur chantier. Chapitre : Le bétonnage par temps chaud ou froid. (en ligne en format PDF). Collection Technique Cimbéton T 82. Edition octobre 2006.
- [18] J.-P. OLLIVIER, J.-M. TORRENTI, Chapitre 3. «La structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert»,83p.
- [19] Marchand, J., Pigeon, M. (1996). Résistance du béton à l'écaillage dû au gel en présence de sels fondants. Une revue des récents développements dans le domaine, Conférence RILEM : Béton - Du matériau à la structure, Arles, France, pp. 179-210.
- [20] T.H. Vu. *Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires*. Thèse de Doctorat, Toulouse, 2009.
- [21] Monicart, R. (1975), *Caractéristiques des roches réservoirs : analyse des carottes*, cours de production de l'IFP, Deuxième ed., 94pp., Ed.Technip.
- [22] Rougelot, J. D. Burlion, D. Bernard; and F. Skoczylas (2010). « About microcracking due to leaching in cementations composites: X-ray microtomography description and numerical approach». *cem, concr, Res*; 40(2), 271-283.

- [23] QUENARD D., KALIFA P. PARDO. Mesure du facteur de formation et de la perméabilité dans des pâtes de ciment. Thème de recherche OA9 du L.C.P.C, CSTB, Paris, février 1999, 24p.
- [24] GAGNÉ R.,GCI 714. Durabilité et réparations du béton. Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Québec, 2000, 338 p.
- [25] QUENARD D., KALIFA P., PARDO., Mesure du facteur de formation et de la perméabilité dans des pâtes de ciment, Thème de recherche OA9 du L.C.P.C, CSTB,Paris, février 1999, 24p.
- [26] DAIAN J.-F., Coefficients de transfert : application des modèles et comparaison avec les mesures, Rapport de fin de contrat, Thème de recherche OA9 du L.C.P.C. : Transfert dans les bétons et durabilité des ouvrages, décembre 1999, L.T.H.E. deGrenoble, 30 p.
- [27] GAGNÉ R., GCI 714 - Durabilité et réparations du béton, Université de Sherbrooke - Centre de Longueuil, Québec, 2000, 338 p.
- [28] MEHTA P.K., MANMOHAN D. Pore size distribution and permeability of hardened cement paste. 7e Congrès international de la Chimie des ciments, Paris, 3,7.1, 1980, p. 1-11;
- [29] RANC R., CARIOU B. Quality and durability of concretes made with fillerized cements. The French experience. BRE seminar on limestone-filled cements, Londres, 28 novembre 1989.
- [30] PICANDET V. Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydraulique des bétons. Thèse, Université de Nantes, 2001.
- [31] HERMANN K. Perméabilité au gaz des bétons. Bulletin du ciment, November 2000.
- [32] PERRATON D. Perméabilité aux gaz des bétons hydrauliques. Thèse de doctorat d'Université. Toulouse: l'INSA de Toulouse, 1992, p210.
- [33] JOOSS M. and REINHARD H.W. Permeability and diffusivity of concrete as fonction of temperature. Cement and Concrete Research vol.32(9), p.1497-1504, 2002.
- [34] ROUSSET TOURNIER Bénédicte. Transferts par capillarité et évaporation dans des roches – rôle des structures de porosité. Thèse de doctorat d'université. Strasbourg : Université de Strasbourg, 2001, p197.
- [35] HUAN HE. Analyse de l'effet d'un adjuvant biosourcé pour élaborer des matériaux cimentaires plus éco-respectueux. Thèse de doctorat d'université. Strasbourg : INSA de Strasbourg, 2015, p159.
- [36] Norme NF EN 196-1, Avril 2006, Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination de la résistance mécanique, Edition Afnor, Paris, 2006.

- [37] Norme EN 934-2, Août 2012, Adjuvants pour bétons, mortier et coulis – Partie 2 : exigences, conformité, marquage et étiquetage, Edition Afnor, Paris, 2012.
- [38] Norme NF EN 196-3, janvier 2009, Méthodes d'essais des ciments – Détermination du temps de prise et de la stabilité, Edition Afnor, Paris, 2009.
- [39] Norme NF EN 480-2 Septembre 2013, Adjuvants pour béton, mortier et coulis – Méthodes d'essai – Détermination du temps de prise, Edition Afnor, Paris, 2013.
- [40] Norme NF P 18-459, Mars 2010, Béton – Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique, Edition Afnor, Paris, 2009.
- [41] Norme NF EN 480-5, Janvier 2006, adjuvants pour béton, mortier et coulis- Méthodes d'essai – Détermination de l'absorption capillaire, Edition Afnor, Paris, 2006.
- [42] Q. Zeng, K. Li, T. Fen-Chong, P. Dangla, Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials* 28 (2012) 468-475.
- [43] S. Maria, Methods for porosity measurement in lime based mortars, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 2572-2578.
- [44] T.T.X. Dinh, Etude expérimentale et numérique de l'approche physico-chimique pour le matériau hétérogène : Application au matériau cimentaire soumis au dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Thèse de l'Université d'Evry Val d'Essonne (2012).

## **Annexes**

## A : Ciments utilisés



## FICHE PRODUIT

### Fabriqué à HEMING

Mise à jour du 05/03/2010

### Ciment Portland

NF EN 197-1/A1	CEM I 52,5 N N° de certificat : 0333-CPD-2902	01/06/2001
CE+NF	CEM I 52,5 N CE CP2 NF	03/04/2000
NF P15-318	Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint	CP2
CE+BENOR	CEM I 52,5 N CE BENOR N° de certificat : 10/92/340/1	25/06/2009
CE/CE+U	CEM I 52,5 N	01/06/2001

Disponibilités : Vrac

### COMPOSITION DÉCLARÉE (en %)

Constituant		Régulateur de prise	
Clinker (K) . . . . .	95	Gypse . . . . .	—
Laitier de haut-fourneau (S) . . . . .	—	Anhydrite . . . . .	4,8
Filler pouzzolanique (Z) . . . . .	—	Autre sulfate de calcium . . . . .	—
Sulfate de calcium (Cs) . . . . .	—		
Pouzzolanes naturelles (P) . . . . .	—		
Cendres volantes siliceuses (V) . . . . .	—	<b>Additif</b>	
Cendres volantes calciques (W) . . . . .	—	Agent de mouture CXN2	0,056
Calcaires (L ou LL) . . . . .	—	Sulfate ferreux	0,35
Constituants secondaires . . . . .	5		

### RESISTANCES A LA COMPRESSION (en MPa)

1 jour . . . . .	<b>25</b>	2 jours . . . . .	<b>38</b>	7 jours . . . . .	<b>47</b>	28 jours . . . . .	<b>59</b>
------------------	-----------	-------------------	-----------	-------------------	-----------	--------------------	-----------

### CARACTÉRISATION PHYSIQUE

Sur poudre		Sur pâte pure		Sur mortier	
Masse volumique (en g/cm <sup>3</sup> ) . . . . .	<b>3,14</b>	Besoin en eau (en %) . . . . .	<b>31,9</b>	Chal. hydr. 41h (en J/g) . . . . .	—
Surface massique (en cm <sup>2</sup> /g) . . . . .	<b>4250</b>	Stabilité (en mm) . . . . .	<b>0,8</b>		
Indice de clarté . . . . .	<b>63,5</b>	Début de prise (en min) . . . . .	<b>160</b>		

### CARACTÉRISATION CHIMIQUE

PAF	INS	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	S <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	CaO <sub>libre</sub>	Na <sub>2</sub> O éq actif
0,7	0,3	19,8	4,5	3,2	61,3	4,6	3,7	1,07	0,27	0,00	0,05	0,2	1,3	0,97

Composition potentielle du clinker : C3A **7,6** C3S **58,2** C4AF **9,9**

La reproduction partielle ou intégrale de ce document est interdite sans accord préalable de notre part. Les résultats faisant l'objet du présent document sont basés sur des valeurs moyennes et sont donnés à titre purement indicatif. Etant susceptibles de varier dans les limites autorisées par les normes correspondantes, ils ne sauraient engager la responsabilité de Holcim France ou Holcim Belgique.

**FICHE TECHNIQUE****Fabriqué à HEMING**

Mise à jour du 04/03/2013

**Ciment Portland au laitier**

NF EN 197-1/A1	CEM II/B-S 42,5 N N° de certificat : 0333-CPD-2904	01/06/2001
CE+NF	CEM II/B-S 42,5 N CE CP1 NF	24/07/1998
NF P15-318	Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint	CP1
CE+BENOR	CEM II/B-S 42,5 N CE BENOR N° de certificat : 13/92/341	25/06/2009

Disponibilités : Vrac

**COMPOSITION DÉCLARÉE (en %)**

Constituant		Régulateur de prise	
Clinker (K)	67	Gypse	–
Laitier de haut-fourneau (S)	31	Anhydrite	4,1
Schiste calciné (T)	–	Autre sulfate de calcium	–
Sulfate de calcium (Cs)	–		
Pouzzolanes naturelles (P)	–		
Cendres volantes siliceuses (V)	–	Agent de mouture	CXN2 0,070
Cendres volantes calciques (W)	–	Sulfate ferreux	0,30
Calcaires (L ou LL)	–		
Constituants secondaires	2		

**RESISTANCES A LA COMPRESSION (en MPa)**1 jour ..... **14**    2 jours ..... **23**    7 jours ..... **36**    28 jours ..... **56****CARACTÉRISATION PHYSIQUE**

Sur poudre		Sur pâte pure		Sur mortier	
Masse volumique (en g/cm <sup>3</sup> )	3,1	Besoin en eau (en %)	31	Chal. hydr. 41h (en J/g)	–
Surface massique (en cm <sup>2</sup> /g)	3800	Stabilité (en mm)	1,3		
Indice de clarté	65,8	Début de prise (en min)	240		

**CARACTÉRISATION CHIMIQUE (en %)**

PAF	INS	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	S <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	CaO <sub>libre</sub>	Na <sub>2</sub> O équ actif
0,6	0,4	24,1	6,2	2,4	54,6	5,5	3,0	0,88	0,31	0,27	0,04	0,4	1,4	0,76

Composition potentielle du clinker : C3A 7                      C3S 57                      C4AF 10



La reproduction partielle ou intégrale de ce document est interdite sans accord préalable de notre part.  
Les résultats faisant l'objet du présent document sont basés sur des valeurs moyennes et sont donnés à titre purement indicatif. Etant susceptibles de varier dans les limites autorisées par les normes correspondantes, ils ne sauraient engager la responsabilité de Holcim France ou Holcim Belgique.





## FICHE PRODUIT

### Fabriqué à HEMING

Mise à jour du 05/03/2010

### Ciment de haut-fourneau

NF EN 197-1	CEM III/A 42,5 N-LH N° de certificat : 0333-CPD-2909	28/11/2007
CE+NF	CEM III/A 42,5 N-LH CE PM-ES-CP1 NF	28/11/2007
NF P15-317	Ciments pour travaux à la mer	PM
NF P15-319	Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates	ES
NF P15-318	Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint	CP1
CE/CE+U	Ciments à faible chaleur d'hydratation	LH

Disponibilités : Vrac

### COMPOSITION DÉCLARÉE (en %)

Constituant		Régulateur de prise	
Clinker (K).....	37	Gypse.....	–
Laitier de haut-fourneau (S).....	61	Anhydrite.....	4,0
Filler pouzzolanique (Z).....	–	Autre sulfate de calcium.....	–
Sulfate de calcium (Cs).....	–		
Pouzzolanes naturelles (P).....	–		
Cendres volantes siliceuses (V).....	–	Agent de mouture	<u>Additif</u> CXN2 0,047
Cendres volantes calciques (W).....	–	Sulfate ferreux	– 0,20
Calcaires (L ou LL).....	–		
Constituants secondaires.....	2		

### RESISTANCES A LA COMPRESSION (en MPa)

1 jour ..... **6**    2 jours ..... **15**    7 jours ..... **37**    28 jours ..... **55**

### CARACTÉRISATION PHYSIQUE

Sur poudre		Sur pâte pure		Sur mortier	
Masse volumique (en g/cm <sup>3</sup> ).....	3,00	Besoin en eau (en %).....	29,4	Chal. hydr. 41h (en J/g).....	242
Surface massique (en cm <sup>2</sup> /g).....	4400	Stabilité (en mm).....	0,4		
Indice de clarté.....	72,1	Début de prise (en min).....	205		

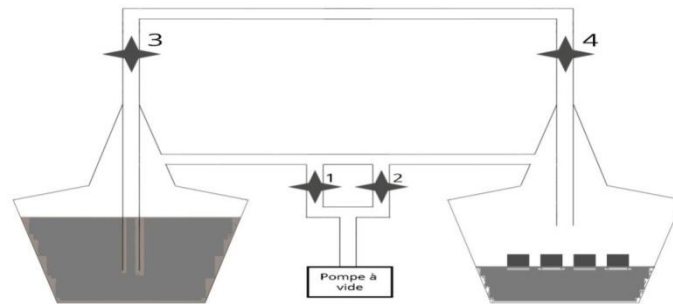
### CARACTÉRISATION CHIMIQUE

PAF	INS	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	S <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	CaO <sub>liber</sub>	Na <sub>2</sub> O éq actif
1,5	0,6	28,9	8,7	1,9	48,1	5,5	2,9	0,97	0,39	0,53	0,26	0,9	1,0	0,92

Composition potentielle du clinker : C3A 7,6    C3S 58,2    C4AF 9,9



La reproduction partielle ou intégrale de ce document est interdite sans accord préalable de notre part. Les résultats faisant l'objet du présent document sont basés sur des valeurs moyennes et sont donnés à titre purement indicatif. Etant susceptibles de varier dans les limites autorisées par les normes correspondantes, ils ne sauraient engager la responsabilité de Holcim France ou Holcim Belgique.

**B : Détermination de la porosité d'un mortier durci selon la NF P18-459****Présentation de l'essai :**

1. Imbibition sous vides des éprouvettes :

- Remplir un dessiccateur avec l'eau du robinet jusqu'à un niveau indiqué ;



- Dans le dessiccateur contenant les éprouvettes ; on met l'eau jusqu'en dessous de la grille percée, on met les éprouvettes sans qu'elles se touchent, on ferme le dessiccateur après avoir placé le tuyau au-dessus des éprouvettes ;



- On ouvre tous les robinets (il faut ouvrir les robinets mais pas trop, sinon ça crée une fuite) et on s'assure que la pompe est bien raccordée et on met en marche la pompe à vide ;



- A T = 3heures ; on isole le dessiccateur contenant l'eau en fermant les robinets 1 et 4 ;
- A T = 4heures ; on reconnecte les deux dessiccateurs ensemble en ouvrant le robinet 4, le dessiccateur contenant les éprouvettes va alors se remplir d'eau jusqu'à 2cm de recouvrement (si jamais le remplissage s'arrête et que les éprouvettes ne sont pas recouvertes d'au moins 2cm d'eau, alors il faut recommencer les étapes « T=3h » et « T=4h ») ; une fois les éprouvettes dans l'eau, on ferme le circuit en fermant les robinets 1, 2 et 4 et on arrête la pompe ;



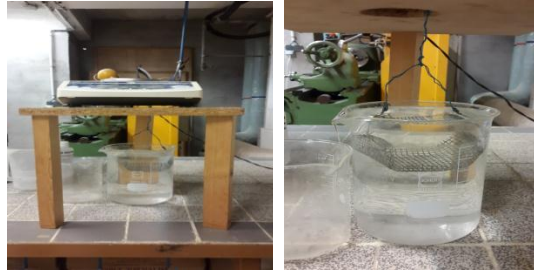
- A T=48h ; casser le vide en 3 étapes :
  - ✓ S'assurer que les robinets 1 et 2 soient bien fermés
  - ✓ Déconnecter la pompe
  - ✓ Ouvrir les robinets 1 et 2 progressivement

Les dessiccateurs sont remplis d'air et peuvent donc être ouverts



## 2. Pesée hydrostatique :

- Tarer la balance... après avoir stabilisé le niveau d'eau dans le bécher
- Peser la demi-éprouvette dans l'eau après avoir à nouveau stabiliser le niveau d'eau du bécher



## 3. Pesée de l'éprouvette humide :

Peser la demi-éprouvette après l'avoir légèrement essuyée avec un tissu humide (sans absorber l'eau).

## 4. Pesée de l'éprouvette sèche :

Mettre à l'étuve à 52°C ... jusqu'à stabilisation de la masse (cette étape dure environ 10 jours quand l'éprouvette est sèche, sa masse ne varie pas de plus de 0.05% en 24h), ensuite, peser la demi-éprouvette sèche.

## 5. Calcul de la porosité et de la masse volumique :

- Porosité accessible à l'eau (%):

$$\varepsilon = 100 \times \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

- Masse volumique apparente ( $\text{kg/m}^3$ )

$$\rho = \rho_{eau} \times \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

## 6. Résultats des essais de porosité :

## - Mortier à base de CEM I :

## a. Mortier témoin (0% BA)

Echantillons	a	b	c	d	e	f
Meau (g)	165,35	162,92	161,57	163,75	159,52	167,55
Mair(g)	295,34	289,31	287,48	289,89	284,53	296,71
Ms (g)	275,84	269,6	267,97	270,41	264,79	276,54

## b. Mortier bio-adjuvanté (1.5% BA)

Echantillons	a	b	c	d	e	f
Meau (g)	164,53	162,28	163,86	161,92	164,44	162,89
Mair(g)	291,84	288,58	290,98	287,96	292,85	289,59
Ms (g)	272,87	269,97	270,13	268,15	273,32	269,39

## - Mortier à base de CEM II :

## a. Mortier témoin (0% BA)

Echantillons	a	b	c	d	e	f
Meau (g)	165,55	165,38	164,87	164,07	165,23	167,82
Mair(g)	292,27	291,73	291,78	289,09	291,41	296,29
Ms (g)	271,41	270,57	269,97	268,45	270,43	274,46

## b. Mortier bio-adjuvanté (1.5% BA)

Echantillons	a	b	c	d	e	f
Meau (g)	164,24	157,16	159,28	162,1	164,48	162,29
Mair(g)	293,66	279,9	283,58	290,89	294,01	289,49
Ms (g)	269,89	256,52	260,73	267,52	269,8	265,66

## - Mortier à base de CEM III

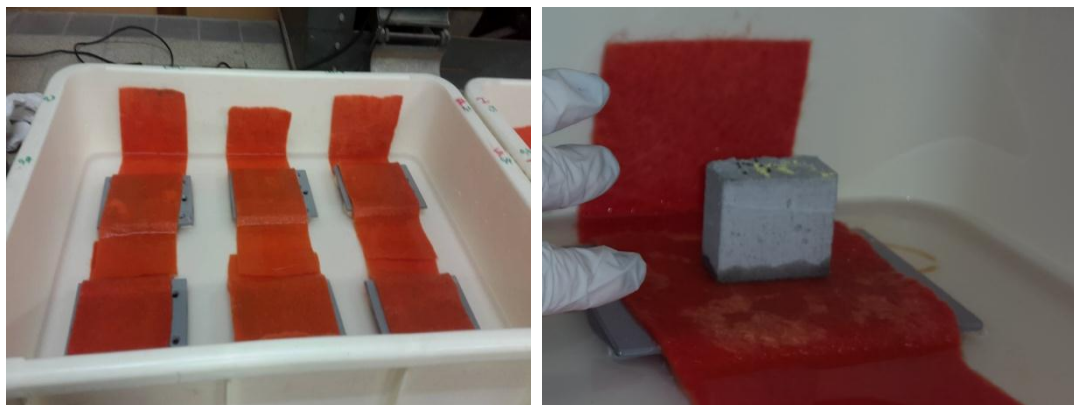
## a. Mortier témoin (0% BA)

Echantillons	a	b	c	d	e	f
M <sub>eau</sub> (g)	34,46	36,09	35,73	36,13	36,51	36,31
M <sub>air</sub> (g)	60,81	63,67	63,19	63,18	64,03	63,82
M <sub>s</sub> (g)	55,88	58,61	57,99	58,3	59,01	58,8

## b. Mortier bio-adjuvanté (1.5% BA)

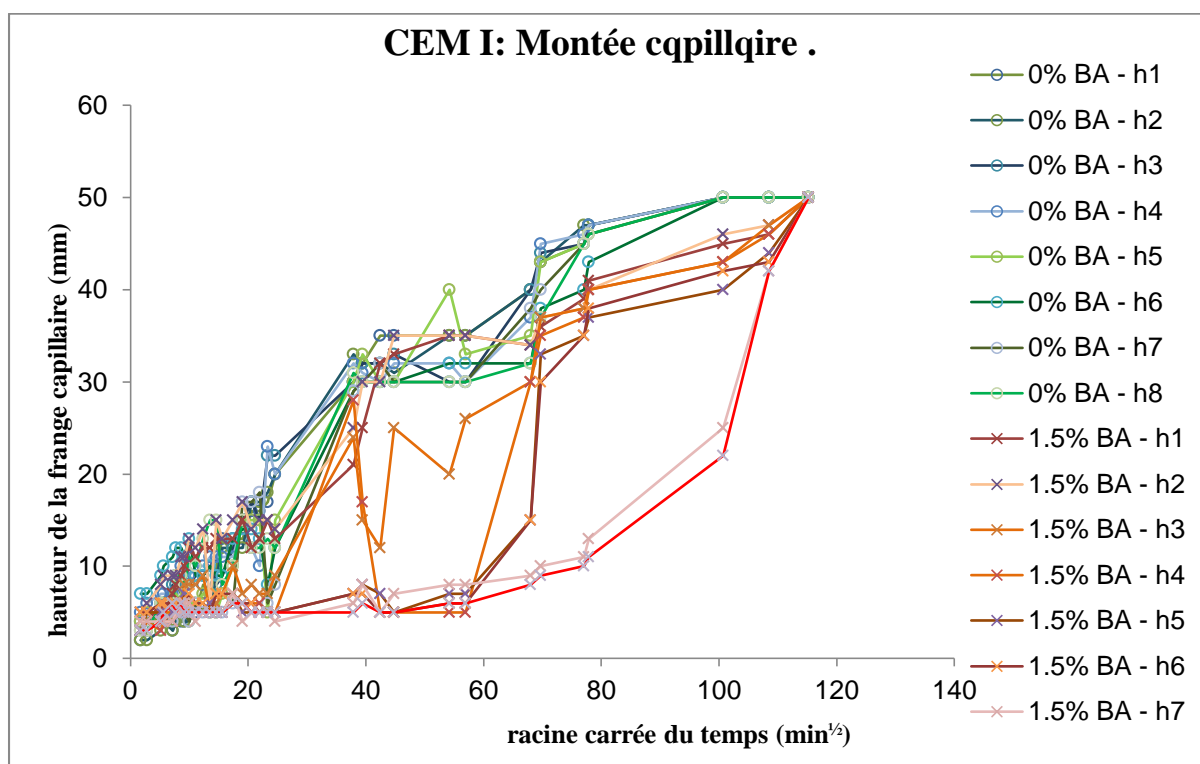
Echantillons	a	b	c	d	e	f
M <sub>eau</sub> (g)	33,4	35,2	34,07	34,3	38,42	34,15
M <sub>air</sub> (g)	62,77	63,93	59,06	61,54	68,91	62,44
M <sub>s</sub> (g)	57,49	58,69	54,6	56,42	63,22	57,1

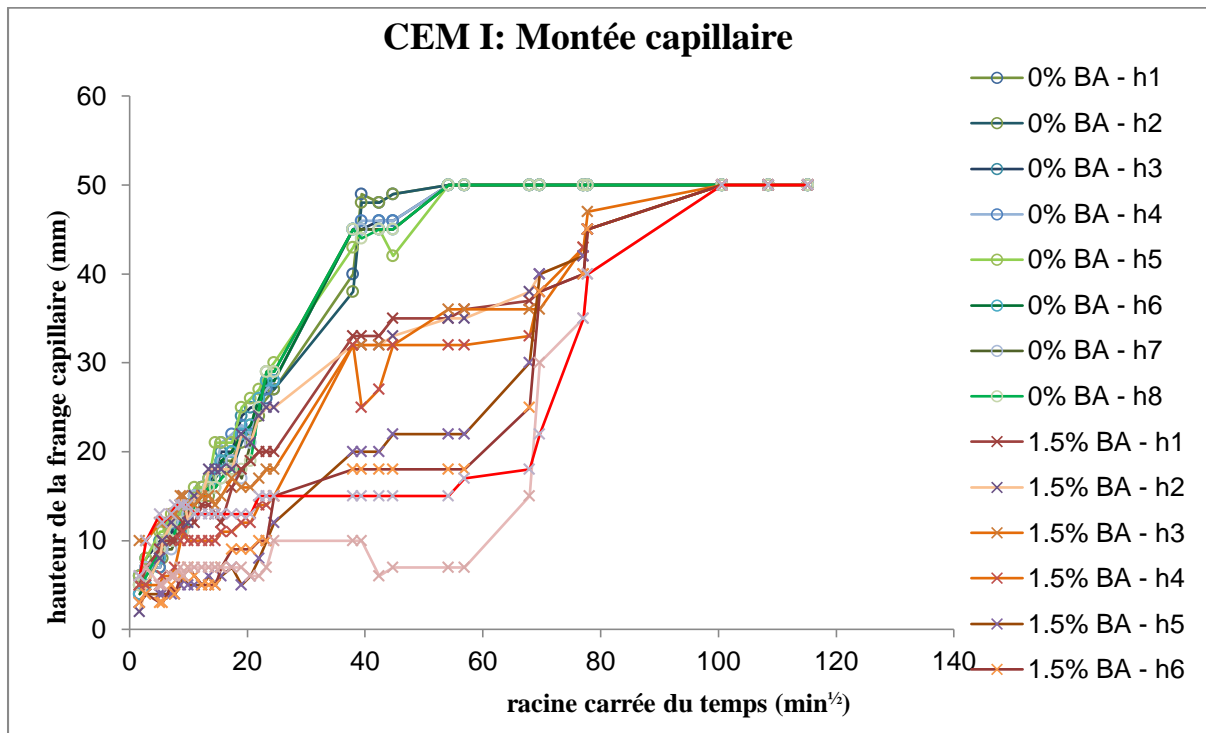
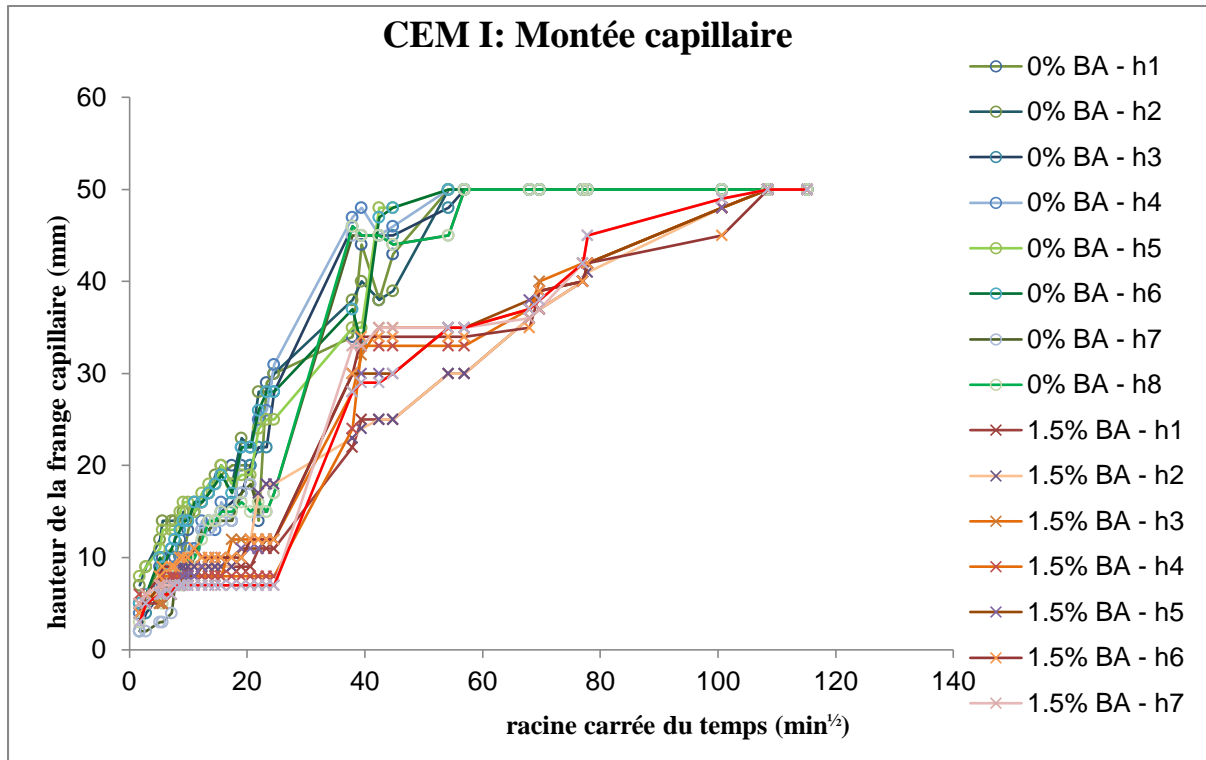
### C : Essai d'imbibition capillaire selon la norme NF EN 480-5



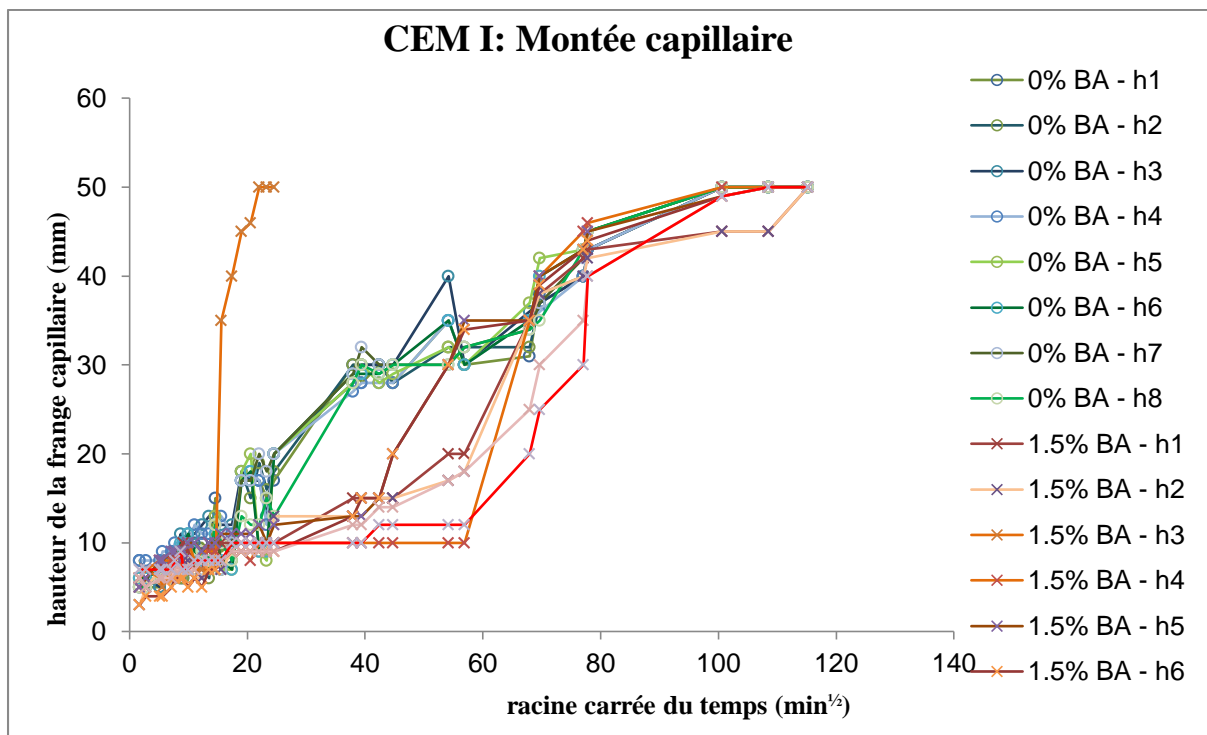
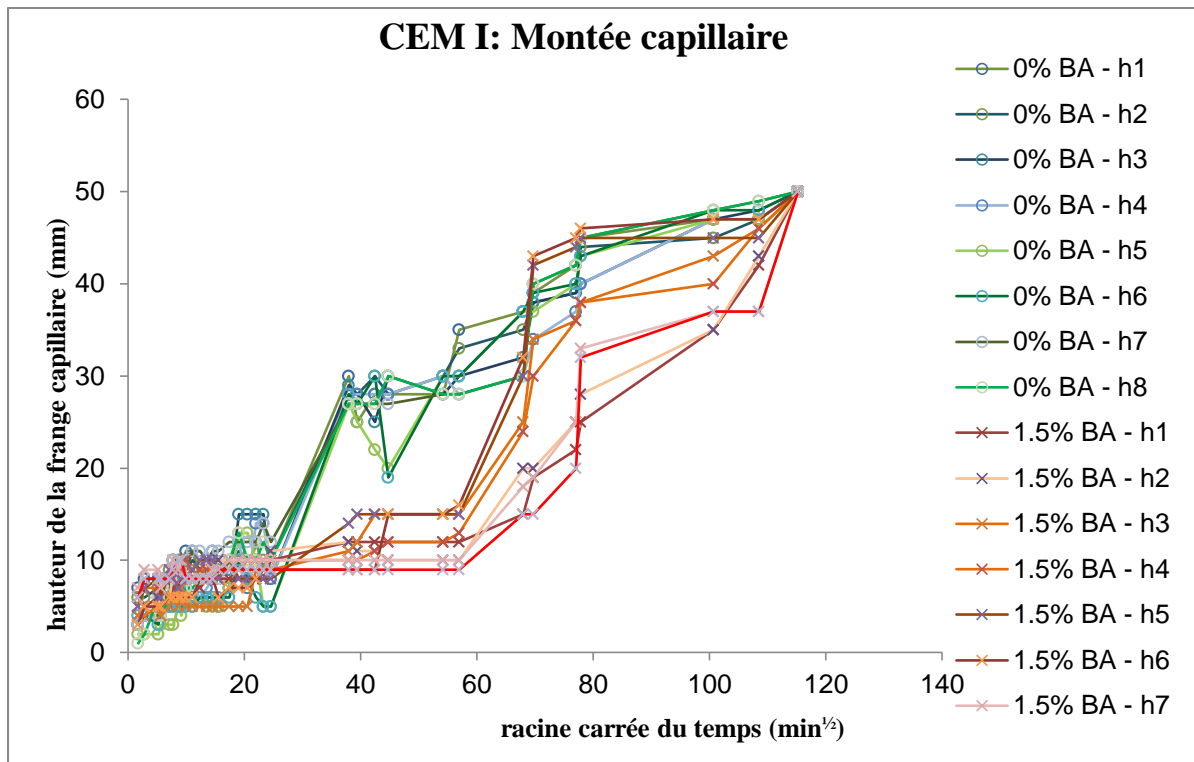
Les résultats de la montée capillaires des échantillons de mortier sont donnés çï-dessous :

- Mortier à base de CEM I (surface d'imbibition 25 m<sup>2</sup>)

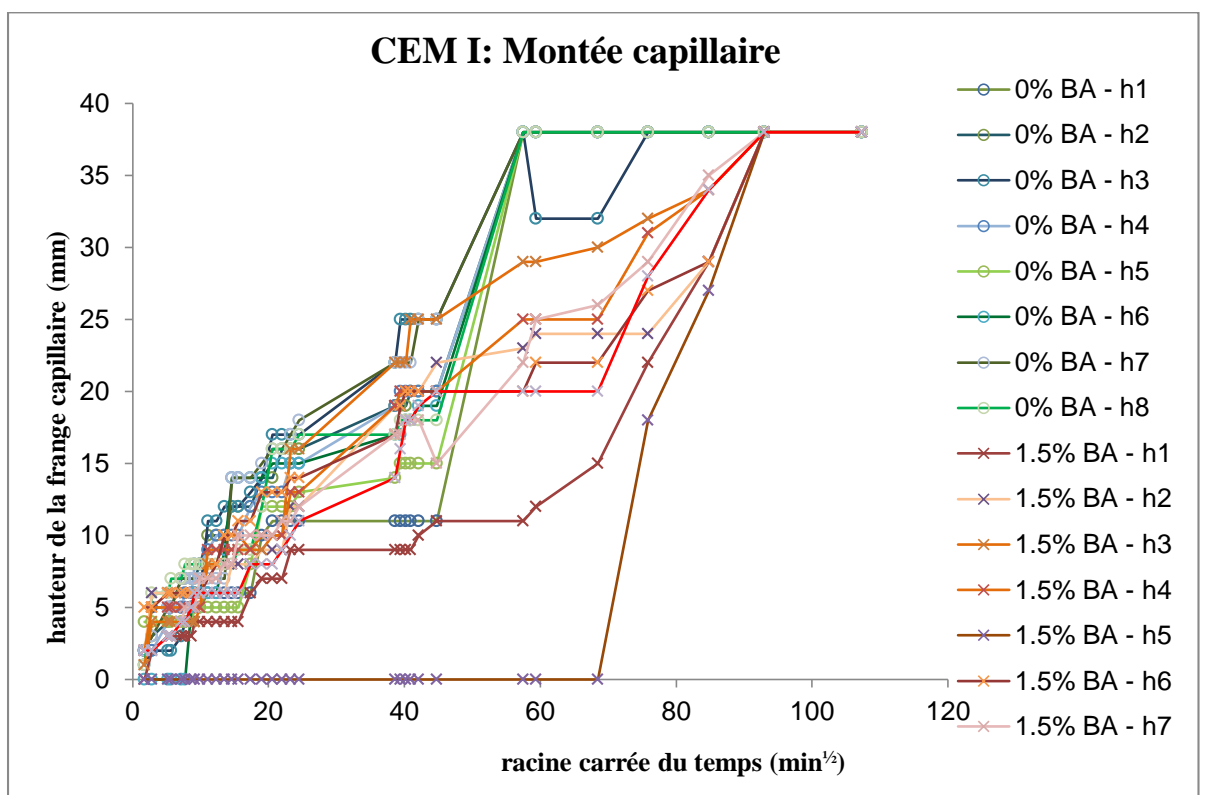
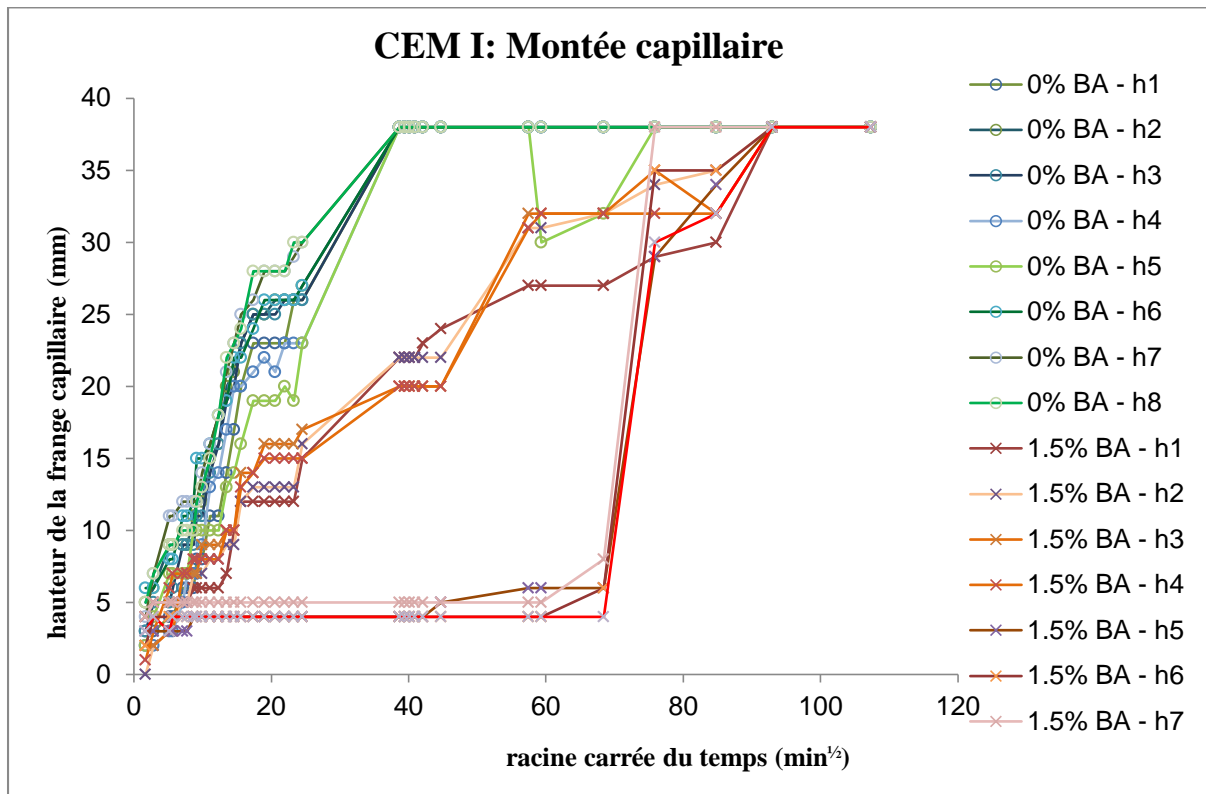


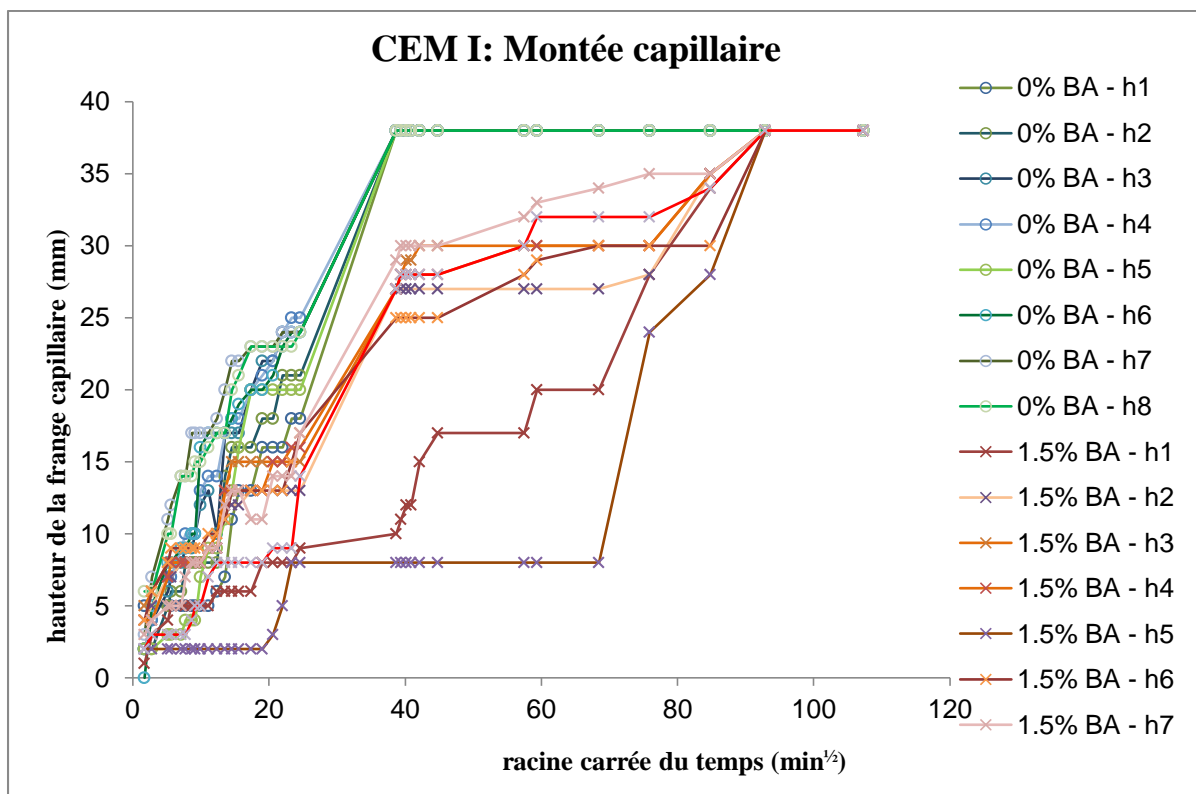
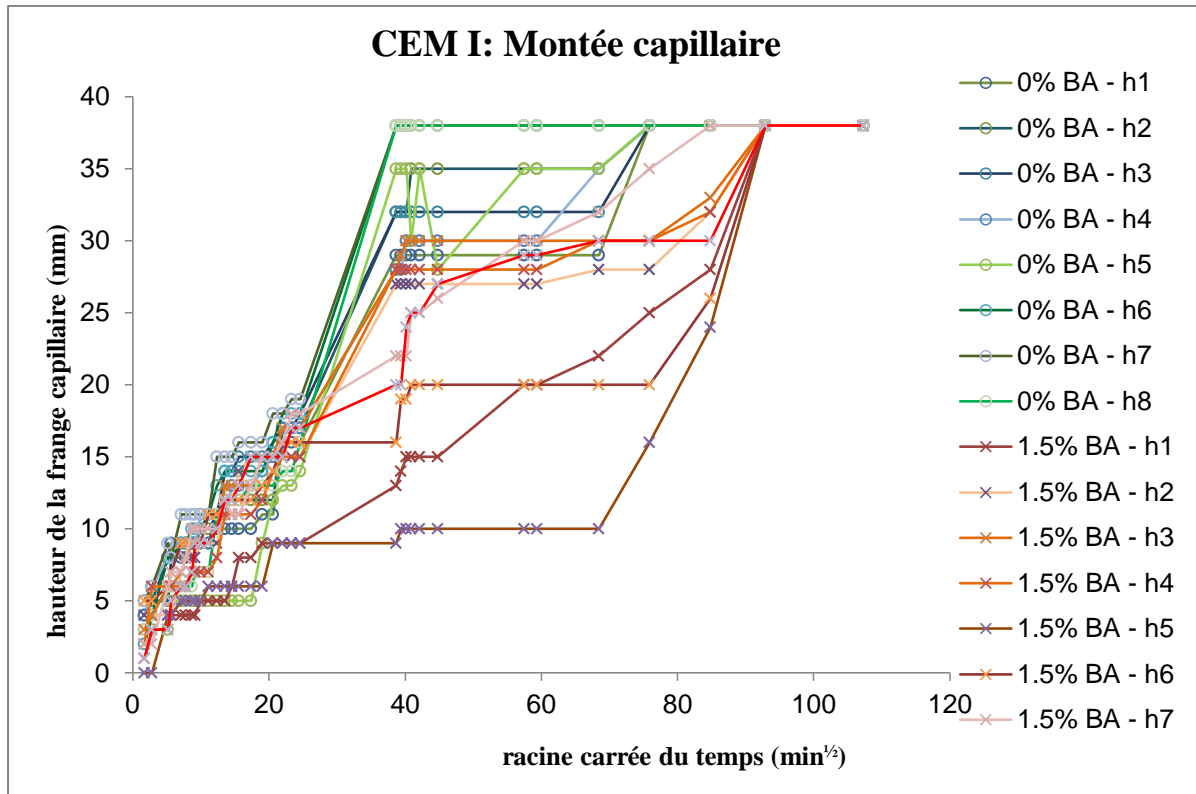


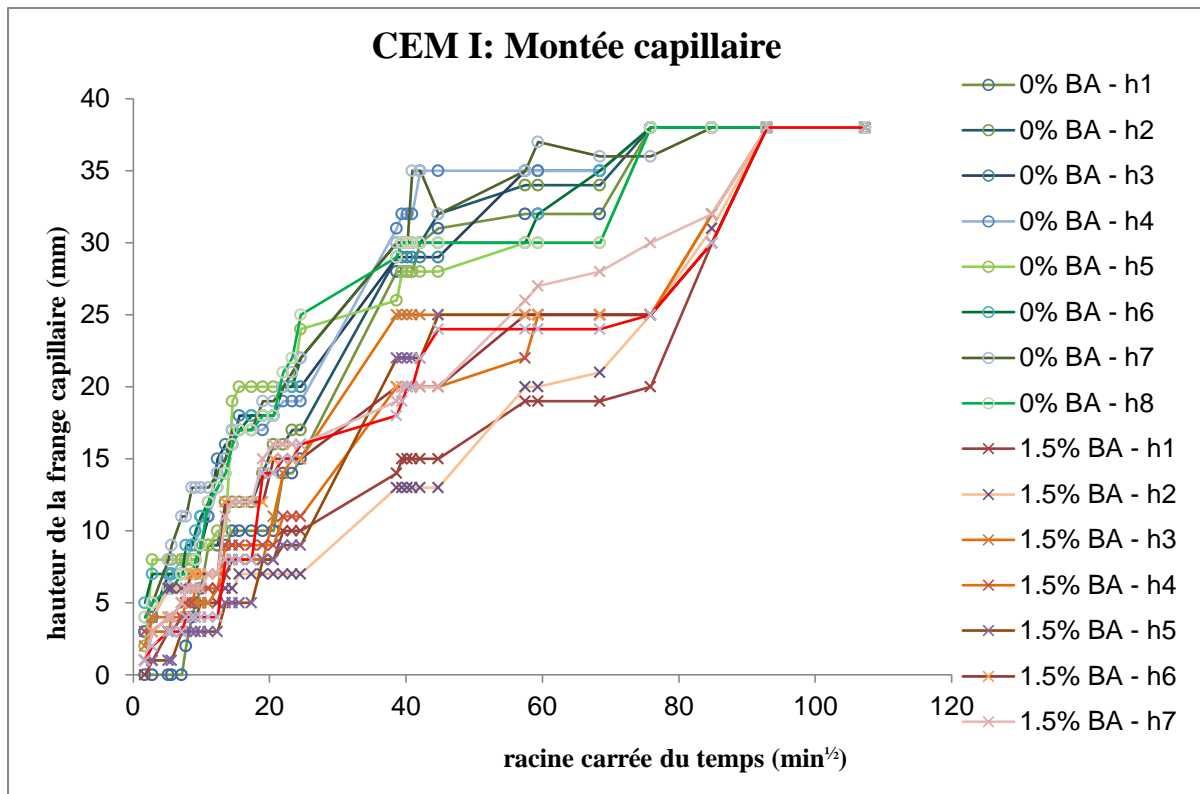




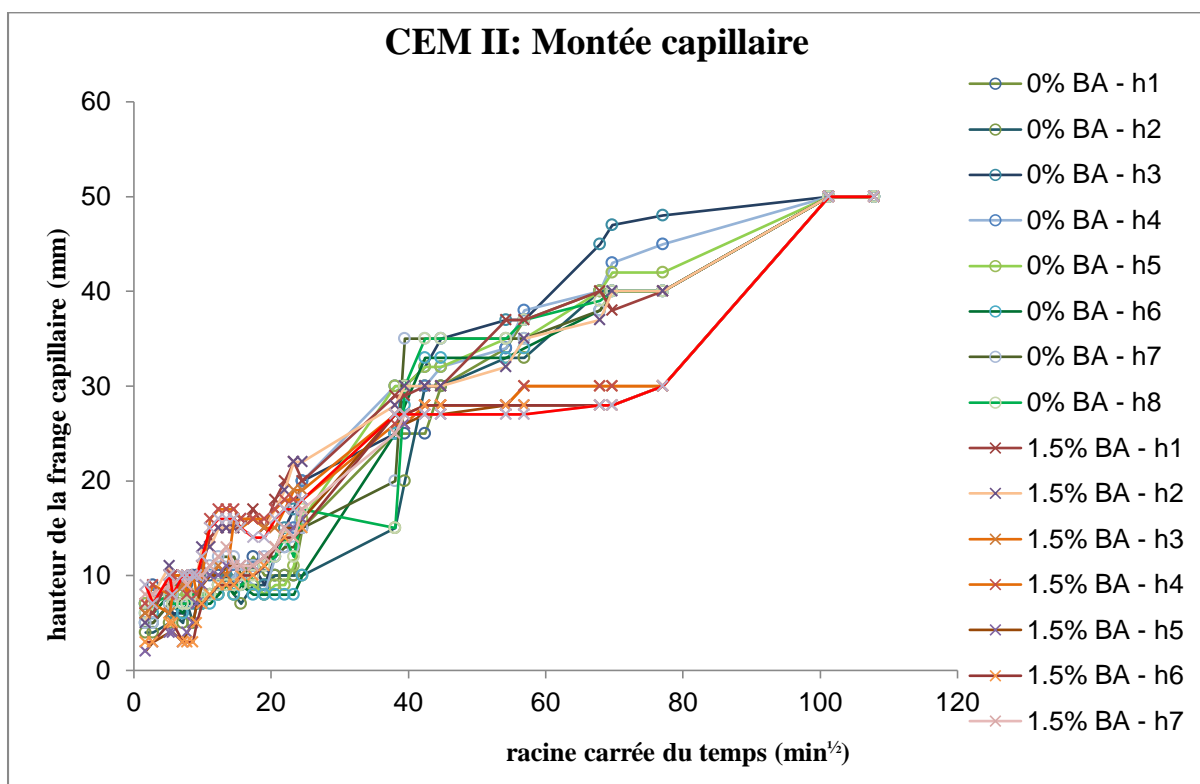
- Mortier à base de CEM I (surface d'imbibition 8 m<sup>2</sup>)

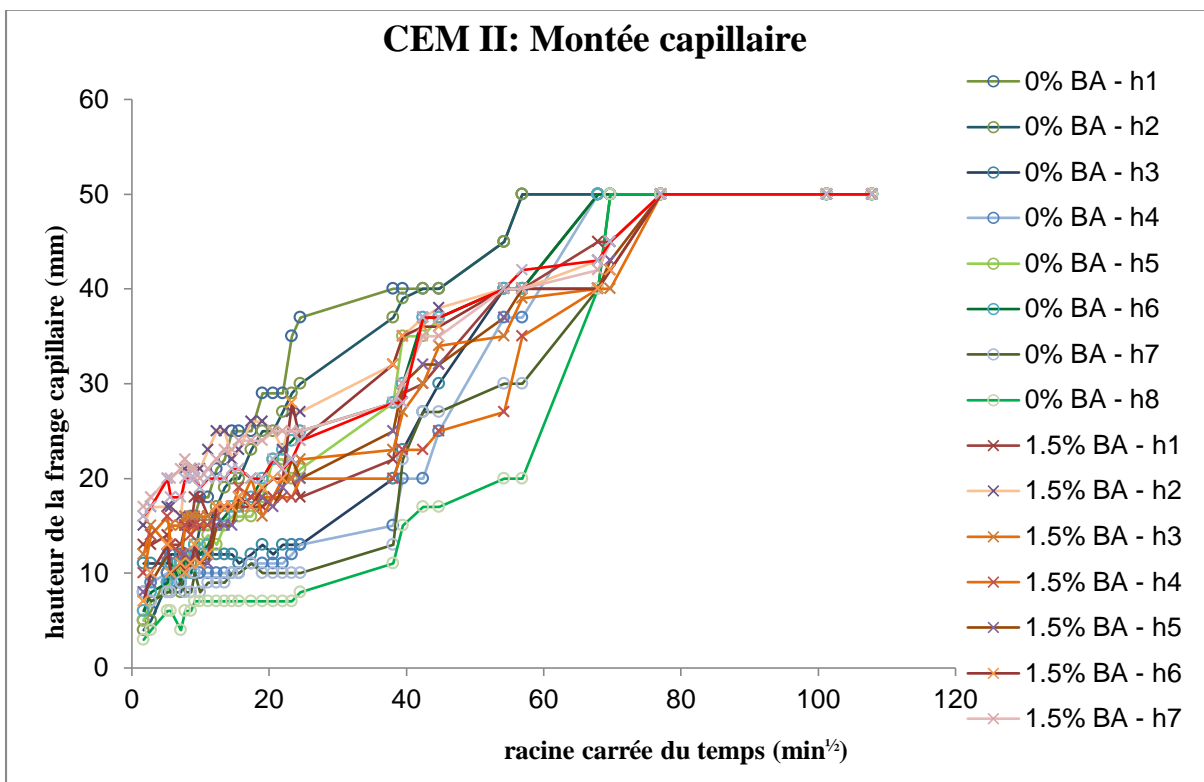
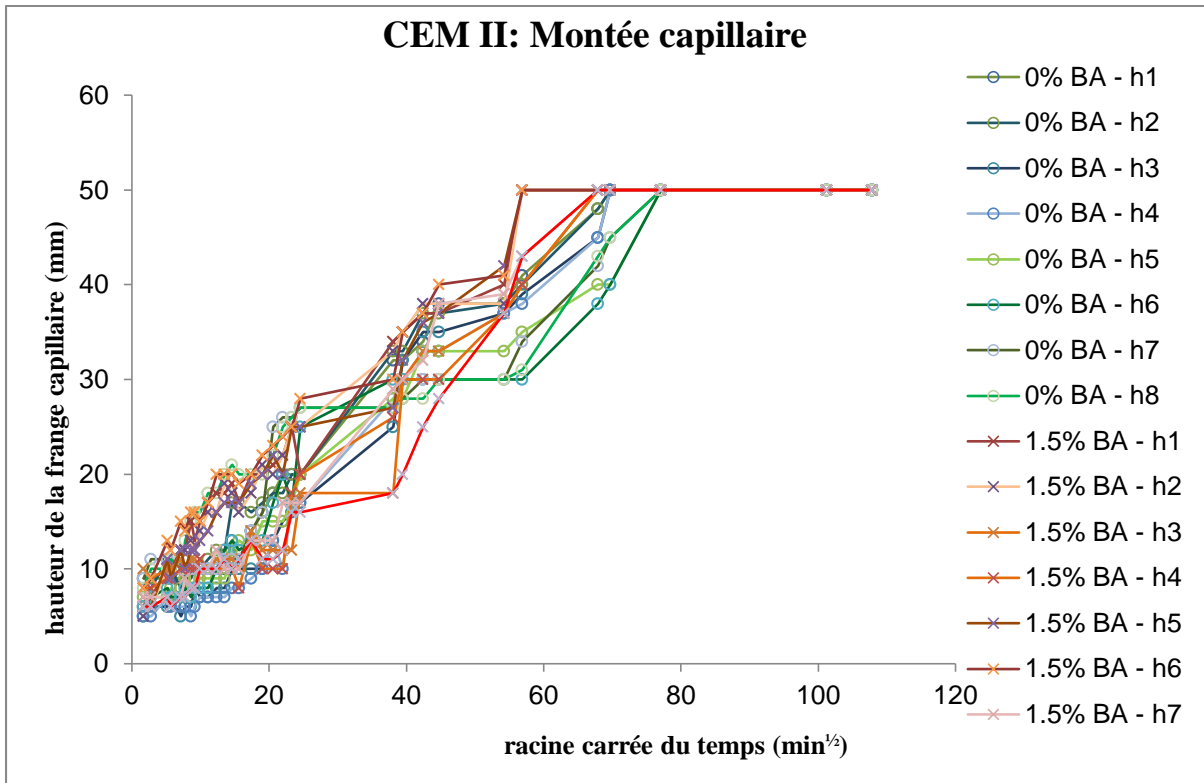


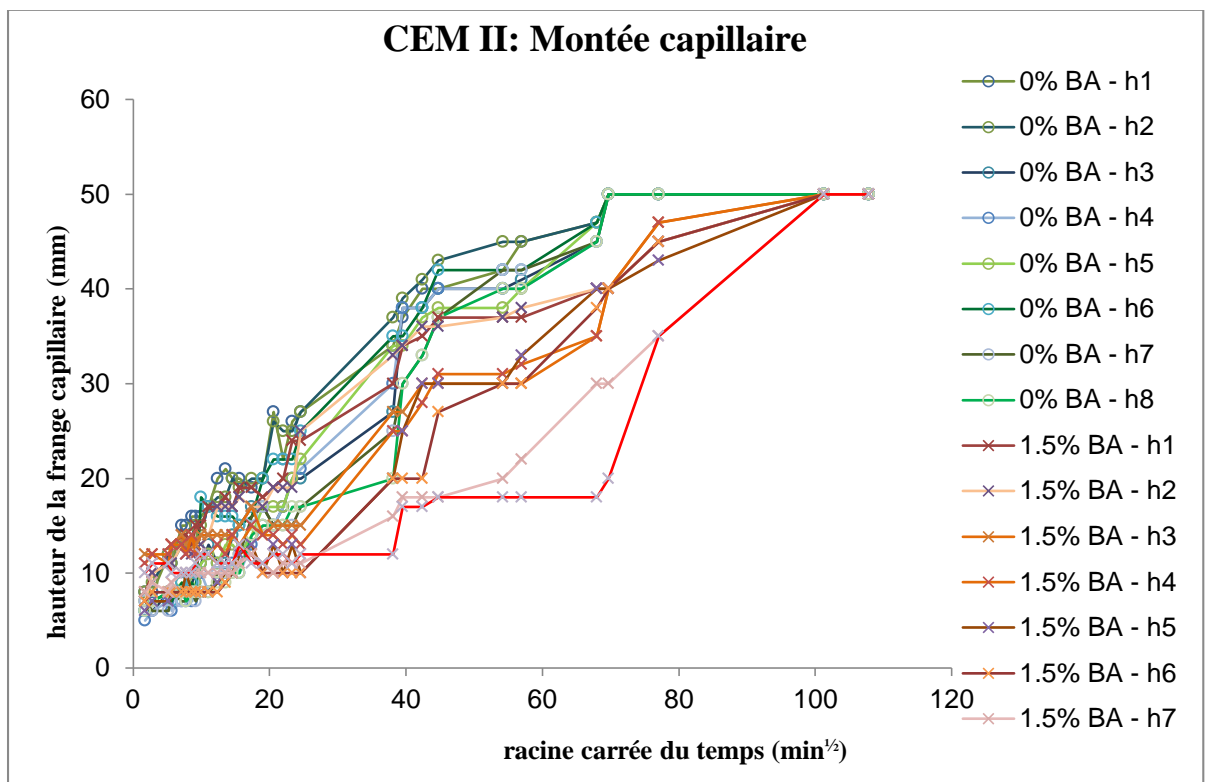
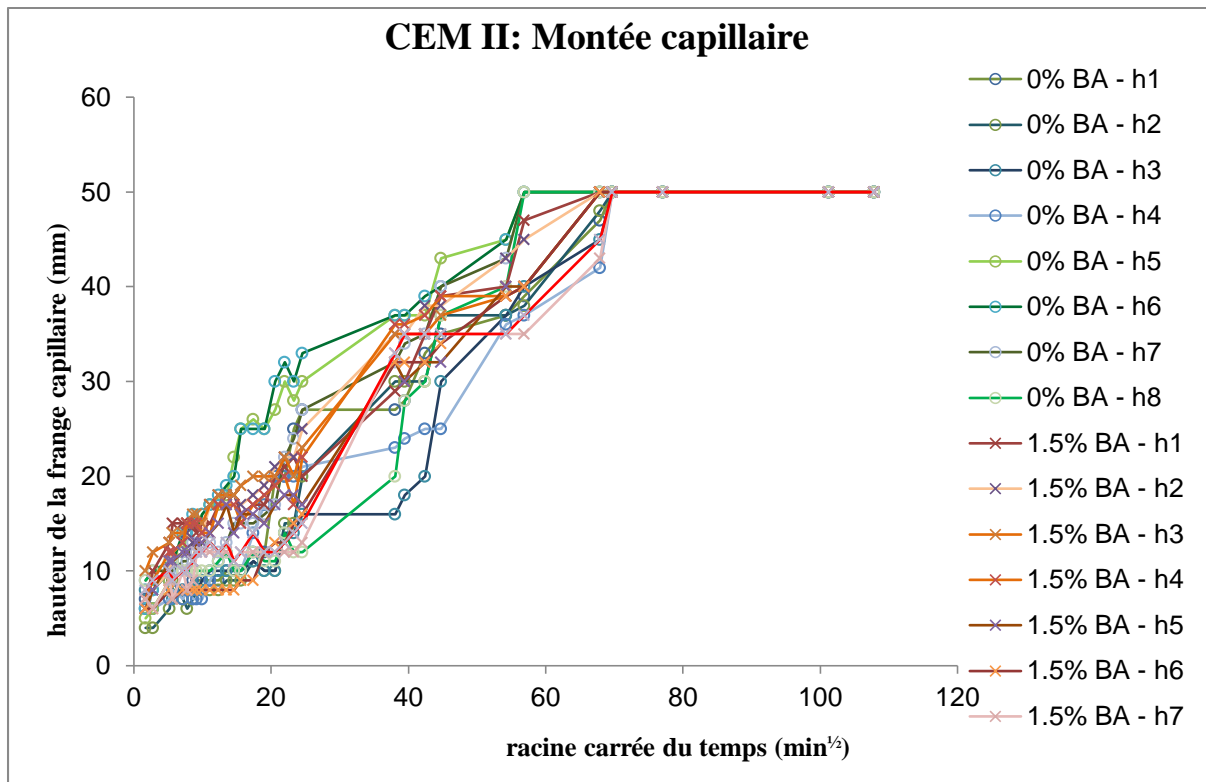




- Mortier à base de CEM II (surface d'imbibition  $25 \text{ m}^2$ )







- Mortier à base de CEM III (surface d'imbibition 8 m<sup>2</sup>)

