

# UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

## THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité: Génie civil

DURABILITE DU BETON AUTOPLAÇANT EN CLIMAT CHAUD

Par

**Walid YAHIAOUI**

Devant le jury composé de :

|                  |       |                          |               |
|------------------|-------|--------------------------|---------------|
| GRINE KHALED.    | Prof. | U. Saad Dahleb-Blida     | Président     |
| MOHAMED GHRICI   | Prof. | U. HB de Chlef           | Examineur     |
| KARIM EZZIANE    | Prof. | U. HB de Chlef           | Examineur     |
| AHMED HADJ SADOK | M.C.A | E.N.S.H -Blida           | Examineur     |
| KENAI SAID       | Prof. | U. Saad Dahleb-Blida     | Rapporteur    |
| MENADI BELKACEM  | Prof. | U. Saad Dahleb Blida     | Co-Rapporteur |
| EL-Hadj Kadri    | Prof. | U. Cergy Pontoise-France | Invité        |

Blida, 2018

## Résumé

Le développement durable aux cours des dernières années a porté naissance à une nouvelle génération des bétons autoplaçants (BAP) qui sont très fluides, homogènes et stables qui se mettent en place sans vibration par le seul effet de la gravité. Le comportement des BAP en climat chaud est lié aux spécificités de formulation de ces bétons. En effet, les performances des BAP dans un climat modéré sont bien étudiées. Cependant, peu d'études sont disponibles sur les effets de l'environnement chaud et sec.

L'Algérie est connue par son climat chaud c'est pourquoi il est important d'évaluer l'influence de temps chaud sur la durabilité des BAP. Dans cette thèse, deux paramètres ont été étudié, l'effet du climat chaud sur les performances de BAP et l'influence du laitier de haut fourneau sur le comportement rhéologique et la durabilité des BAP après une cure humide initiale. Le ciment a été substitué par laitier à deux teneurs à savoir (15% et 25%). Le programme expérimental élaboré permet de conserver les éprouvettes lors de la maturation soit dans un environnement standard ( $T = 20^\circ$ , HR = 100%) ou en plein air dans la région de Blida durant la période d'été, après une période de cure humide initiale de 3, 7 ou 28 jours.

La résistance à la compression à 28 et 90 jours, la perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire, la perméabilité aux ions chlore et la porosité ont été étudiés. Les résultats expérimentaux montrent l'importance de la cure humide et que le climat chaud affecte négativement les performances des BAP. Les corrélations trouvées entre les paramètres rhéologiques et les caractéristiques du BAP à l'état frais confirment le comportement du béton contenant du laitier qui améliore l'ouvrabilité des bétons et la durabilité des BAP à long terme.

**Mot clés :** bétons autoplaçants, laitier, climat chaud, cure, rhéologie, résistance, durabilité.

## Abstract

The sustainable development during the last years gave birth to a new generation of self-compacting concrete (SCC) because of its excellent fluidity, homogeneous, stability and followability, by the effect of gravity with no vibrations. The behavior of the SCC in hot climate is related to the specificities of mix design of these concretes. Indeed, the performances of the SCC in a moderate climate are well studied. However, few studies are available on the effects of hot and dry environment.

Algeria is known by its hot climate that is why it is important to estimate the influence of hot weather on the durability of the SCC. In this thesis two factors were studied: the effect of the hot climate on the performances of SCC and the influence of blast furnace slag on the rheology behavior and the durability of the SCC after an initial wet cure. The cement was substituted by slag for two contents to be known (15 % and 25 %). The experimental study consisted of storing concrete specimens during the maturation in a standard environment ( $T = 20^\circ$ , HR = 100 %) or outside in open air in the region area of Blida during summer, after a period of initial wet cure of 3, 7 or 28 in the days.

The compression strength at 28 and 90 days, the water depth penetration, the capillary absorption, the chloride permeability and the porosity were studied. The experimental results show the importance of humid curing and how the hot climate affects negatively the performances of SCC. The correlations found between the rheological factors and the characteristics of the SCC in the fresh state confirm the behavior of the concrete containing the slag which improves the workability of concretes and durability of SCC for the long-term.

**Keywords:** self-compacting concrete, slag, hot climate, cure, rheology, compressive strength, durability.

## الملخص

أظهرت التنمية المستدامة في السنوات الأخيرة جيلا جديدا من الخرسانة المرصوصة ذاتيا بسبب السيولة الممتازة، المتجانسة والمستقرة، التي تأخذ مكانها بفعل وزنها الذاتي وبدون رج داخلي أو خارجي. يرتبط سلوك الخرسانة المرصوصة ذاتيا في المناخ الحار بخصائص الصياغة التي تتفرد بها هذه الخرسانة. تم في السابق وبشكل جيد دراسة أداء الخرسانة في مناخ معتدل. ومع ذلك، يوجد عدد قليل من الدراسات في البيئة الحارة والجافة.

وتعرف الجزائر بمناخها الحار ولهذا السبب من المهم تقدير تأثير الطقس الحار على استدامة الخرسانة المرصوصة ذاتيا. تم دراسة عاملين في هذه الأطروحة وهما: تأثير المناخ الحار على أداء الخرسانة المرصوصة ذاتيا وتأثير خبث الفرن على سلوك الانسيابية واستدامة الخرسانة المرصوصة ذاتيا بعد المعالجة الأولية في جو رطب. تم استبدال الخبث بوزن الاسمنت بمحتويين هما (15% و25%). يتلخص البرنامج التجريبي الذي تم تطويره في الحفاظ على العينات أثناء النضج سواء في بيئة قياسية (حرارة=20°م. رطوبة=100%) أو في الهواء الطلق في منطقة البليدة خلال فترة الصيف، بعد فترة من العلاج الأولي الرطب من 3، 7 أو 28 يوم.

تمت دراسة مقاومة الضغط في 28 و90 يوما، ونفاذية المياه مع وجود ضغط للماء، الامتصاص الشعيري، نفاذية الكلوريد والمسامية. وأظهرت النتائج التجريبية أهمية المعالجة الرطبة والتأثير السلبي للمناخ الحار على أداء الخرسانة المرصوصة ذاتيا. تؤكد الارتباطات الموجودة بين العوامل الريولوجية وخصائص الخرسانة المرصوصة ذاتيا في حالة طازجة سلوك الخرسانة التي تحتوي على الخبث الذي يحسن قابلية الخرسانة الطازجة والمتانة من على المدى الطويل.

**كلمات المفاتيح:** الخرسانة المرصوصة ذاتيا، الخبث، المناخ الحار، المعالجة، الريولوجية، مقاومة الضغط، المتانة.

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent, en premier lieu, à mes deux responsables de la thèse, Monsieur Said KENAI, Professeur à l'université de Blida et à Monsieur Belkacem MENADI Professeur à l'université de Blida, pour leur précieuse aide qui a permis de réaliser ce travail. Je les remercie pour leur disponibilité, leurs conseils et orientations ainsi pour leurs grandes qualités humaines. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance. Espérant avoir l'occasion de travailler avec eux dans des futurs travaux.

Je suis également très reconnaissant à Monsieur ELHADJ Kadri, professeur à l'Université de Cergy Pontoise qui m'a accueilli au laboratoire L2MGC (Laboratoire de Mécanique et de matériaux de génie civil) à l'université de Cergy Pontoise et m'a aidé dans la réalisation des études expérimentales.

Je tiens à remercier aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail :

|                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| Professeur Grine Khaled   | Président du jury de thèse |
| Professeur Ghrici Mohamed | Examineur de thèse         |
| Professeur Ezziane Karim  | Examineur de thèse         |
| Docteur HADJ SADOK Ahmed  | Examineur de thèse         |

Je tiens à remercier toute l'équipe du laboratoire de Génie civil et Géo-matériaux à l'Université du Blida.

Mes remerciements s'adressent aussi aux enseignants, du département de génie civil avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

J'adresse aussi mes remerciements à toute l'équipe de GRANITEX qui ont mis à ma disposition des produits nécessaires pour l'élaboration de mon travail de recherche.

Je remercie enfin, particulièrement mes parents, ma femme et tous les membres de ma famille qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ce travail.

## TABLE DES MATIÈRES:

|  |           |
|--|-----------|
| RÉSUME.....  | 1         |
| REMERCIEMENT.....  | 4         |
| TABLE DE MATIÈRE.....  | 5         |
| LISTE DES FIGURES.....   | 10        |
| LISTE DES TABLEAUX.....  | 15        |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS.....  | 17        |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE.....   | 20        |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b>  |           |
| <b>FACTEURS DU CLIMAT CHAUD ET LEURS EFFETS SUR LES</b>                                  |           |
| <b>PERFORMANCES DU BETON ORDINAIRE.....</b>  |           |
|  | <b>22</b> |
| <br>   |           |
| 1.1. Introduction .....  | 22        |
| 1.2. Définition du climat chaud.....   | 22        |
| 1.3. facteurs du climat chaud.....   | 22        |
| 1.3.1. La température.....   | 23        |
| 1.3.2. Humidité relative .....   | 24        |
| 1.3.3. Rayonnement solaire .....   | 24        |
| 1.3.4. Evaporation : .....   | 25        |
| 1.4. Effet du climat chaud sur les performances des bétons ordinaires à l'état frais.... | 26        |
| 1.4.1. Ouvrabilité .....   | 26        |
| 1.4.2. Temps de prise.....   | 29        |
| 1.5. Effet du climat chaud sur les performances des bétons ordinaires à l'état durci.... | 31        |
| 1.5.1. Résistance à la compression .....   | 31        |
| 1.5.2. Retrait plastique.....  | 35        |
| 1.5.3. Perméabilité aux ions chlore.....   | 36        |
| 1.5.4. Absorption capillaire.....  | 37        |
| 1.6. Conclusion.....   | 37        |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE II :</b>   |           |
| <b>REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: BETON AUTOPLAÇANT ET EFFET DU</b>                              |           |
| <b>CLIMAT CHAUD SUR LES PERFORMANCES DES BAP.....</b>                                    |           |
|  | <b>38</b> |

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Généralités .....  | 38 |
| 2.2. Définition, avantages et inconvénients des BAP.....                              | 38 |
| 2.3. Formulation des BAP.....   | 39 |
| 2.4. Caractérisations des BAP à l'état frais .....                                    | 41 |
| 2.4.1. Essai d'étalement.....   | 41 |
| 2.4.2. Essai de la boîte en L .....   | 42 |
| 2.4.3. Essai de V funnel.....   | 42 |
| 2.4.4. Essai de stabilité au tamis.....   | 42 |
| 2.5. Rhéologie des bétons autoplaçants .....  | 43 |
| 2.5.1. Loi de comportements rhéologiques.....   | 43 |
| 2.5.1.1. Fluides Newtoniens.....  | 44 |
| 2.5.1.2. Fluides Non Newtoniens.....  | 44 |
| 2.5.1.3. Thixotropes.....   | 46 |
| 2.5.2. Paramètres rhéologiques.....   | 46 |
| 2.5.2.1. Viscosité.....   | 46 |
| 2.5.2.2. Contrainte de cisaillement.....  | 47 |
| 2.5.2.3. Vitesse de cisaillement.....   | 48 |
| 2.5.2.4. Seuil de cisaillement.....   | 49 |
| 2.5.3. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP .....                      | 49 |
| 2.6. Effet des additions minérales sur les performances des BAP .....                 | 51 |
| 2.6.1. Effet des additions minérales sur les performances des BAP à l'état frais..... | 51 |
| 2.6.2. Effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP.....       | 54 |
| 2.6.3. Effet des additions minérales sur la durabilité des BAP.....                   | 55 |
| 2.6.3.1. Absorption capillaire .....  | 56 |
| 2.6.3.2. Perméabilité aux ions du chlorure.....                                       | 57 |
| 2.6.3.3. Porosité .....   | 57 |
| 2.6.3.4. Perméabilité à l'eau.....  | 58 |
| 2.7. Effet du climat chaud sur les performances des BAP à l'état frais.....           | 58 |
| 2.8. Effet du climat chaud sur la résistance à la compression des BAP .....           | 61 |
| 2.9. Effet du climat chaud sur la durabilité des BAP.....                             | 68 |
| 2.9.1. Carbonatation .....  | 68 |
| 2.9.2. Diffusion des ions du chlorure .....   | 69 |
| 2.9.3. Absorption capillaire.....   | 71 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.9.4. Porosité .....  | 73        |
| 2.9.5. Retrait .....   | 74        |
| 2.10. Conclusion .....   | 74        |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE III :</b>  |           |
| <b>MATÉRIAUX ET ESSAIS.....</b>                                | <b>75</b> |
| <br>   |           |
| 3.1. Introduction.....   | 75        |
| 3.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....              | 75        |
| 3.2.1. Le Ciment.....  | 75        |
| 3.2.2. Le laitier.....   | 75        |
| 3.2.3. Le sable.....   | 80        |
| 3.2.4. Le gravier.....   | 80        |
| 3.2.5. L'eau de gâchage.....                                   | 81        |
| 3.2.6. Les superplastifiants .....                             | 81        |
| 3.3. Formulations adoptées.....                                | 82        |
| 3.3.1. Formulation du mortier autoplaçant.....                 | 82        |
| 3.3.2. Essais réalisés sur MAP.....                            | 83        |
| 3.3.2.1. Essai d'étalement au Mini-Cône .....                  | 83        |
| 3.3.2.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) .....        | 84        |
| 3.4. Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état frais..... | 84        |
| 3.4.1. Essai d'étalement (Slump flow test) .....               | 86        |
| 3.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) .....          | 87        |
| 3.4.3. Essai de la boîte en L .....                            | 87        |
| 3.4.4. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage ..... | 88        |
| 3.4.5. Essai rhéologiques .....                                | 90        |
| 3.5. Mode de cure .....  | 92        |
| 3.6. Essai réalisés sur béton autoplaçant à l'état durci.....  | 94        |
| 3.6.1. Résistance à la compression.....                        | 94        |
| 3.6.2. Absorption capillaire.....                              | 94        |
| 3.6.3. Perméabilité à l'eau.....                               | 96        |
| 3.6.4. La porosité accessible à l'eau.....                     | 98        |
| 3.6.5. La perméabilité des ions chlore.....                    | 100       |
| 3.7. Récapitulatif des essais réalisés .....                   | 102       |

**CHAPITRE IV :****RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : ETAT FRAIS ET RESISTANCE**

|  |            |
|--|------------|
| <b>MECANIQUE.....</b>  | <b>106</b> |
| 4.1. Introduction.....   | 106        |
| 4.2. Optimisation de dosage du superplastifiant .....  | 106        |
| 4.2.1. Effet du superplastifiant sur l'étalement.....  | 107        |
| 4.2.2. Effet de superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel).....   | 108        |
| 4.3. Effet du laitier sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais.....  | 110        |
| 4.3.1. Etalement au mini cône .....  | 110        |
| 4.3.2. Temps d'écoulement (T <sub>vf</sub> ) au V-Funnel .....   | 111        |
| 4.4. Rhéologie des mortiers.....   | 112        |
| 4.4.1. Effet du laitier sur le seuil de cisaillement.....  | 112        |
| 4.4.2. Effet du laitier sur la viscosité .....   | 114        |
| 4.5. Effet du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais.....  | 116        |
| 4.5.1. Etalement et Temps T <sub>50</sub> au cône d'Abrams .....   | 117        |
| 4.5.2. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel.....   | 119        |
| 4.5.3. Mesures du rapport H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> , les temps d'écoulement T <sub>20</sub> et T <sub>40</sub> de l'essai L-Box. | 121        |
| 4.5.4. Résistance à la ségrégation par tamisage.....   | 124        |
| 4.6. Effet du laitier sur la rhéologie des BAP .....   | 125        |
| 4.6.1. Effet du laitier sur le seuil de cisaillement.....  | 125        |
| 4.6.2. Effet du laitier sur la viscosité plastique .....   | 127        |
| 4.7. Effet du climat chaud sur la résistance de compression .....  | 129        |
| 4.8. Conclusion .....  | 134        |

**CHAPITRE V :****RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : DURABILITE DES BAP .....**

|  |            |
|--|------------|
| <b>135</b>                             | <b>135</b> |
| 5.1. Généralité.....                   | 135        |
| 5.2. Absorption capillaire.....        | 135        |
| 5.3. La perméabilité à l'eau.....      | 140        |
| 5.4. Porosité accessible à l'eau.....  | 143        |
| 5.5 Perméabilité aux ions chlore. .... | 146        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 5.6. Conclusion.....            | 147        |
| <b>Conclusion générale.....</b> | <b>149</b> |
| Références.....                 | 152        |
| ANNEXE A.....                   | 166        |
| ANNEXE B.....                   | 169        |
| Article.....                    | 174        |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1.1: Variation des températures dans la région durant la période d'été .....   | 23 |
| Figure 1.2: Variation de l'humidité dans la région durant la période d'été .....  | 23 |
| Figure 1.3: Vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques .....                                  | 26 |
| Figure 1.4: Accroissement de la température du béton en fonction de celle des Constituants.....   | 28 |
| Figure 1.5: Effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm .....        | 28 |
| Figure 1.6: Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C .....                | 29 |
| Figure 1.7: Effet de la température sur le temps de début et fin de prise .....   | 30 |
| Figure 1.8: Effet de la température sur le temps de début de prise .....  | 30 |
| Figure 1.9: Effet de la température sur le temps de fin de prise .....  | 31 |
| Figure 1.10: Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide .....   | 32 |
| Figure 1.11: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage .....                 | 32 |
| Figure 1.12: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide ..... | 33 |
| Figure 1.13: Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité .....                  | 33 |
| Figure 1.14: Gain de la résistance à la résistance à la compression .....   | 34 |
| Figure 1.15: Gain de la résistance à la traction .....  | 34 |
| Figure 1.16: Influence de la température d'exposition sur la pénétration des chlorures dans le béton .....  | 36 |
| Figure 2.1: Les différents comportements rhéologiques des fluides .....   | 45 |
| Figure 2.2: Comportement d'un corps thixotropique.....  | 46 |
| Figure 2.3: Schéma du glissement des couches.....   | 47 |
| Figure 2.4: Schéma de la vitesse de cisaillement.....   | 48 |
| Figure 2.5: Comportements rhéologiques pour différents types de béton.....  | 50 |
| Figure 2.6: La perméabilité aux ions chlore des BAP à base des ajouts minéraux.....   | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.7: Influence des températures chaudes et froides sur étalement des BAP .....   | 59 |
| Figure 2.8: Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température pour différentes pâtes de ciment .....  | 60 |
| Figure 2.9: Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en superplastifiant .....  | 60 |
| Figure 2.10: Variation de la résistance à la compression .....  | 62 |
| Figure 2.11: Evolution des résistances à 16h, 7j et 28 j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment III/A.....   | 62 |
| Figure 2.12: Résistance à la compression de type I: (a) dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> .....   | 63 |
| Figure 2.13: Résistance à la compression de type II: (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> .....                                       | 64 |
| Figure 2.14: Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type I : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> ...  | 64 |
| Figure 2.15: Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type II : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m <sup>3</sup> ; (b) dosage en ciment = 450 kg/m <sup>3</sup> ... | 65 |
| Figure 2.16: Résistance à la compression des éprouvettes de béton selon le pourcentage d'EPA et les conditions de cure .....  | 65 |
| Figure 2.17: Développement de la résistance à la compression des BAP selon la durée de cure initiale dans l'eau et selon des différentes conditions de cure.....                                | 66 |
| Figure 2.18: Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau, (b) couvert et (c) air .....  | 67 |
| Figure 2.19: Effet de la durée de cure dans l'eau sur la résistance à la compression des BAP .....  | 67 |
| Figure 2.20: Profondeur de carbonatation dans des différentes initiale et conditions de cure .....  | 68 |
| Figure 2.21: Corrélation entre la résistance à la compression et profondeur de carbonatation des BAP .....  | 69 |
| Figure 2.22: Diffusion des ions du chlorure des BAP après une cure initiale et dans différentes conditions de cure .....  | 70 |
| Figure 2.23: Coefficient de diffusion des ions chlore d'un BAP après 28 jours .....   | 71 |
| Figure 2.24: Sorptivité des bétons dans des différentes conditions de cure.....   | 72 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 2.25: Effets de pourcentage de granulats légers sur la porosité apparente sous des conditions différentes de cure à 28 jours ..... | 72  |
| Figure 2.26: Porosité totale de BAP conservés à 20°C, 60°C et 80°C .....  | 73  |
| Figure 3.1 : Laitier granulé de haut fourneau utilisée : (a) avant broyage, (b) après broyage.....  | 76  |
| Figure 3.2: Broyeur à boulet utilisé.....   | 76  |
| Figure 3.3: DRX du laitier granule d'El-Hadjar . .....  | 79  |
| Figure 3.4: DRX du laitier cristallisé d'El-Hadjar . .....  | 79  |
| Figure 3.5: Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.....  | 81  |
| Figure 3.6: Séquence de malaxage du mortier. ....   | 83  |
| Figure 3.7: Essai d'Étalement pour Mortier. ....  | 83  |
| Figure 3.8: Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier. ....   | 84  |
| Figure 3. 9: Séquence du malaxage du béton autoplaçant.....   | 85  |
| Figure 3.10: Essai d'étalement. ....  | 86  |
| Figure 3. 11: Essai V-funnel. ....  | 87  |
| Figure 3.12: Essai de la boîte en L. ....   | 88  |
| Figure 3.13: Essai de stabilité au tamis. ....  | 89  |
| Figure 3.14: Rhéomètre Heidolph- RZR 2102. ....   | 91  |
| Figure 3.15: Schéma descriptif du rhéomètre. ....   | 91  |
| Figure 3.16: Profil de vitesse. ....  | 92  |
| Figure 3.17: Eprouvtes conservées dans l'eau douce. ....  | 93  |
| Figure 3.18: Eprouvtes conservées à l'air libre. ....   | 93  |
| Figure 3.19: Dispositif de l'essai de compression simple. ....  | 94  |
| Figure 3.20: Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité..   | 95  |
| Figure 3.21: Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression.....   | 97  |
| Figure 3.22: Essai de perméabilité à l'eau. ....  | 97  |
| Figure 3.23: Mesure de la profondeur de pénétration d'eau. ....   | 98  |
| Figure 3.24: Sciage des éprouvettes. ....   | 99  |
| Figure 3.25: Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes. ....   | 100 |
| Figure 3.26: Schéma de la cellule de perméabilité aux ions chlore..   | 101 |
| Figure 3.27: Découpage des éprouvettes. ....  | 101 |
| Figure 3.28: Appareil de mesure de la perméabilité aux ions chlore. ....  | 102 |
| Figure 3.29: Organigramme des différents essais d'optimisation sur mortier. ....  | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 3.30: Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état frais.....   | 104 |
| Figure 3.31 :Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état durci.....   | 105 |
| Figure 4.1: Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.....  | 108 |
| Figure 4.2: Temps d'écoulement en fonction de dosage de superplastifiant.....   | 109 |
| Figure 4.3: Effet de la teneur du laitier sur l'étalement des MAP.....  | 110 |
| Figure 4.4: Effet de la teneur du laitier sur le temps d'écoulement des MAP.....  | 112 |
| Figure 4.5: Effet de la teneur du laitier sur le seuil de cisaillement.....   | 113 |
| Figure 4.6: Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement $T_{vf}$ .....  | 114 |
| Figure 4.7: Effet de la teneur du laitier sur la viscosité plastique.....   | 115 |
| Figure 4.8: Corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement.....  | 116 |
| Figure 4.9: Etalement et le temps d'écoulement $T_{50}$ en fonction de la teneur en laitier. ....   | 119 |
| Figure 4.10: $T_{V-Funnel}$ en fonction de la teneur en laitier. ....   | 121 |
| Figure 4.11: Rapport H2/H1 en fonction de la teneur en laitier. ....  | 122 |
| Figure 4.12: Temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ en fonction de la teneur en laitier.....   | 124 |
| Figure 4.13: Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction de la teneur en laitier. ....   | 125 |
| Figure 4.14: Effet du laitier sur le seuil de cisaillement. ....  | 126 |
| Figure 4.15: Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement $T_{vf}$ .....   | 127 |
| Figure 4.16: Effet du laitier sur la viscosité plastique. ....  | 128 |
| Figure 4.17: Corrélation entre la viscosité et l'étalement des BAP. ....  | 129 |
| Figure 4.18: Effet de la durée de cure sur la résistance à la compression à 28 jours....  | 133 |
| Figure 4.19: Effet de la durée de cure sur la résistance à la compression à 90 jours...   | 134 |
| Figure 5.1: Effet de la durée de cure sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 0% laitier. ....        | 138 |
| Figure 5.2: Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 15% laitier. .... | 138 |
| Figure 5.3: Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 25% laitier. .... | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 5.4: Effet de la durée de cure sur la sorptivité des grands pores des BAP à base de laitier. ....  | 139 |
| Figure 5.5: Corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité. ....   | 140 |
| Figure 5.6: Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau. ....  | 142 |
| Figure 5.7: Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure. .... | 144 |
| Figure 5.8: Effet de la durée de cure sur la Porosité accessible à l'eau des BAP à base de laitier. ....  | 145 |
| Figure 5.9: Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau. ....  | 145 |
| Figure 5.10: Effet de la durée de cure sur perméabilité aux ions chlore.....  | 147 |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 1.1 : Influence de la température sur le coefficient de diffusion des chlorures..                                     | 37  |
| Tableau 2.1 : Modèles de comportement rhéologique des fluides .....   | 45  |
| Tableau 2.2 : Paramètres rhéologiques des pates ciments, mortier et béton .....   | 49  |
| Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....   | 75  |
| Tableau 3.2 : Composition chimique de ciment.....   | 75  |
| Tableau 3.3: Composition chimique du laitier d'El Hadjar .....  | 77  |
| Tableau 3.4 : Indice d'Activité hydraulique du laitier granulé .....  | 78  |
| Tableau 3.5: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé.....   | 80  |
| Tableau 3.6 : Caractéristiques physique de gravier.....   | 87  |
| Tableau 3.7 : Classes d'étalement .....   | 89  |
| Tableau 3.8 : Essai de caractérisation des BAP à l'état frais .....   | 98  |
| Tableau 3.9 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau .....  | 107 |
| Tableau 4.1 : Compositions des mortiers obtenues en fonction du rapport optimale SP/L.....                                    | 107 |
| Tableau 4.2 : Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant. ....   | 109 |
| Tableau 4.3: Valeur de temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant.....                                      | 110 |
| Tableau 4.4: Valeurs de l'étalement au Mini cône.....   | 111 |
| Tableau 4.5: Valeurs du temps d'écoulement au V-Funnel .....  | 113 |
| Tableau 4.6: Valeur du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du laitier.....                              | 115 |
| Tableau 4.7: Valeur de la viscosité en fonction du taux de substitution du laitier.....                                       | 116 |
| Tableau 4.8: Composition des BAP testés (kg/m <sup>3</sup> ) .....  | 117 |
| Tableau 4.9: Valeurs recommandés pour les essais du BAP .....   | 117 |
| Tableau 4.10: Valeurs de l'étalement et le temps d'étalement T <sub>50</sub> au cône d'Abrams.                                |     |
| Tableau 4.11: Valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel (T <sub>vf</sub> ) .....  | 119 |
| Tableau 4.12: Valeurs du rapport H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> , T <sub>20</sub> et T <sub>40</sub> de l'essai de L-Box..... | 121 |
| Tableau 4.13: Valeurs de la laitance en fonction de la teneur en laitier .....  | 125 |
| Tableau 4.14: Valeur du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du laitier.....                             | 126 |

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 4.15: Valeur de la viscosité plastique en fonction du taux de substitution du laitier..... | 128 |
| Tableau 4.16: Résistance à la compression à 28 et 90 jours des BAP.....                            | 129 |
| Tableau 5.1: Résultats de l'absorption d'eau par capillarité et sorptivité .....                   | 137 |
| Tableau 5.2: Perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.....     | 141 |
| Tableau 5.3 : Porosité ouverte $P_w$ en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.....  | 143 |

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

|            |  |
|------------|--|
| $A_{bG}$   | Coefficient d'absorption du gravier        |
| $A_{bs}$   | Coefficient d'absorption du sable          |
| BAP        | Béton autoplaçant                          |
| BAPR       | Béton autoplaçant de référence             |
| BHP        | Béton de Haute Performance                 |
| BO         | Béton ordinaire                            |
| BV         | Béton Vibré                                |
| C          | Ciment                                     |
| C+A        | Ciment+Addition                            |
| $Ca CO_3$  | Carbonate de calcium                       |
| CEM I 42,5 | Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5   |
| CEM II     | Ciment Portland composé                    |
| $CO_2$     | Dioxyde de carbone                         |
| C-S-H      | Silicate de calcium hydraté                |
| CV         | Cendres volantes                           |
| $D_{max}$  | Diamètre maximal des Granulats             |
| E          | Eau  |
| $E/(C+A)$  | Eau / (Ciment+Addition)                    |
| E/C        | Eau/Ciment                                 |
| E/L        | Eau/Liant                                  |
| $E_{vol}$  | Le pourcentage d'eau en volume, (%)        |
| FA         | Fumée de silice                            |
| G          | Gravier                                    |
| G/S        | Gravier/Sable                              |
| LCPC       | Laboratoire Central des Ponts et Chaussées |
| MBE        | Mortier de Béton Equivalent                |
| MK         | Métakaolin                                 |
| MOR        | Mortier                                    |
| PC         | Polycarboxylate                            |
| PZN        | Pouzzolane naturelle                       |
| REF        | Référence                                  |
| $R_m$      | Vitesse relative                           |

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| S/M                                   | Sable/Mortier   |
| SCC                                   | Self-Compacting Concrete  |
| SF                                    | Slump flow  |
| SP                                    | Superplastifiant  |
| SP/L                                  | Superplastifiant/Liant  |
| SP/P                                  | Superplastifiant/Poudre   |
| SSB                                   | Surface Spécifique de Blaine  |
| $T_{20}$                              | Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 20 cm, (sec).        |
| $T_{40}$                              | Temps mis après ouverture de la trappe pour atteindre la ligne des 40 cm, (sec).        |
| $T_{50}$                              | Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm (sec). |
| $T_{VF}$                              | Temps d'écoulement à l'entonnoir (sec).   |
| V                                     | Volume, ( $m^3$ )   |
| $V_{\text{sable}}/V_{\text{mortier}}$ | Volume du sable /volume du mortier  |
| $\gamma$                              | Le taux de cisaillement, ( $s^{-1}$ )   |
| $\eta$                                | La viscosité, (Pa.s)  |
| $\eta_P$                              | la viscosité plastique, (Pa.s)  |
| $\rho_{\text{abs}}$                   | Masse volumique absolue, ( $kg/m^3$ )   |
| $\rho_{\text{app}}$                   | Masse volumique apparente, ( $kg/m^3$ )   |
| $\rho_C$                              | Masse volumique du ciment, ( $kg/m^3$ )   |
| $\rho_E$                              | Masse volumique d'eau, ( $kg/m^3$ )   |
| $\rho_G$                              | Masse apparente du gravier, ( $kg/m^3$ )  |
| $\rho_S$                              | Masse volumique du sable, ( $kg/m^3$ )  |
| $\rho_{SP}$                           | Masse volumique du superplastifiant, ( $kg/m^3$ )                                       |
| $\tau$                                | Contrainte de cisaillement, (Pa)  |
| $\tau_0$                              | Seuil de cisaillement, (Pa)   |
| $\Pi$                                 | Pourcentage de laitance, (%)  |
| T                                     | Température ( $^{\circ}C$ )   |
| HR                                    | Humidité (%)  |
| LCPC                                  | Laboratoire central des ponts et chaussées  |
| OPC                                   | Ordinary Portland cement  |

|                |   |
|----------------|---|
| H2/H1          | Rapport de L-Box                                  |
| dS             | Surface élémentaire d'une couche cisillée         |
| dF             | Projection de la force de frottement tangentielle |
| R <sup>2</sup> | Coefficient de corrélation                        |
| FC             | Filler de calcaire                                |

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années: les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP). Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée et sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. Il est très demandé et l'on estime que son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. En revanche, la tendance actuelle dans l'industrie du béton est d'accroître l'utilisation des ajouts minéraux en substituant le ciment pour plusieurs raisons, soit économiques, écologiques ou pour améliorer certaines caractéristiques à l'état frais autant qu'à l'état durci. Le laitier de haut fourneau est un ajout minéral utilisé dans l'industrie du ciment. Son incorporation participe au comportement du béton à l'état frais pour obtenir plus facilement l'autoplaçance (effet fluidifiant en écoulement) et améliore sa durabilité à long terme.

La qualité du béton peut être altérée par une température ambiante élevée, ce qui se traduit d'abord par une augmentation de la température du béton frais. Les conséquences de cette élévation de la température du béton frais sont bien connues : perte rapide de l'ouvrabilité par évaporation et d'un temps de prise fortement raccourci, le retrait au séchage est accru ainsi que la fissuration thermique, les résistances mécaniques sont plus faibles, la durabilité est amoindrie.

Le comportement des BAP au laitier de haut fourneau en climat chaud a fait l'objet de peu d'études et la compréhension des phénomènes qui interviennent lors de mise en œuvre et mise en place est donc nécessaire afin d'étudier leur comportement à long terme dans des environnements chauds comme celui de l'Algérie.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une étude de l'influence du climat chaud sur les performances des BAP à base du laitier. Pour cela, le premier paramètre de l'étude est l'influence de la température sur les BAP exposés à l'air libre et faire une comparaison avec différentes durées de cure. Un deuxième objectif est d'étudier l'influence de la substitution du laitier sur la durabilité des BAP.

La thèse est décomposée en cinq chapitres dont le premier présente l'étude bibliographique qui sera focalisée sur le climat chaud et les différents paramètres intervenant dans les

conditions climatiques qui influent sur les performances du béton en termes d'ouvrabilité et de rhéologie ainsi que les propriétés mécaniques et la durabilité. Le deuxième chapitre présente certaines notions fondamentales relatives aux caractéristiques des bétons autoplaçants et l'influence des conditions climatiques sur les propriétés mécaniques et durabilité des BAP.

Le troisième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du BAP ainsi que les différents essais réalisés en donnant à chaque fois le principe de base de l'essai et en décrivant le mode opératoire. Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des résultats des essais à l'état frais et à la résistance à la compression. Les propriétés analysées à l'état frais sont l'étalement, la boîte en L, le temps d'écoulement, la stabilité au tamis et la rhéologie. La résistance à la compression a été mesurée à 28 jours et 90 jours après une cure humide initiale de 0,3,7 et 28 jours. Le cinquième chapitre présente l'analyse des résultats de durabilité des BAP au laitier et l'influence du climat chaud sur ses performances. Les indicateurs de durabilité analysés sont la perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire, la porosité et la perméabilité aux ions chlore. Ces indicateurs de durabilité sont très importants pour comprendre le comportement des BAP dans un climat chaud.

Enfin, des conclusions générales ainsi que les perspectives de cette étude sont proposées.

## CHAPITRE I :

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : FACTEURS DU CLIMAT CHAUD ET LEURS EFFETS SUR LES PERFORMANCES DU BETON ORDINAIRE

#### 1.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur le climat chaud et les facteurs climatiques ainsi que leurs influences sur les performances des bétons ordinaires à l'état frais et durci.

#### 1.2. Définition du climat chaud

Par définition le temps chaud est défini comme la combinaison des facteurs climatiques qui sont : la température élevée de l'air, la faible humidité relative, la vitesse du vent et du rayonnement solaire, qui tend à détériorer la qualité du béton frais ou durci en accélérant l'évaporation et la vitesse de l'hydratation du ciment et conduit à des propriétés de durabilité amoindries [1].

Le temps chaud peut être défini comme toute période à température élevée, dans laquelle des précautions doivent être prises en compte pour assurer un bon malaxage, transport et durcissement du béton. Les problèmes de temps chaud sont plus fréquemment rencontrés courant de l'été, mais il existe d'autres facteurs climatiques associés comme les grands vents, faible humidité relative et le rayonnement solaire qui peuvent se produire à tout moment, en particulier dans les climats arides ou tropicaux. Les conditions de temps chaud peuvent produire un taux rapide d'évaporation de l'humidité de la surface du béton [2].

Berhan [3] décompose les climats chauds en trois groupes, en se basant sur les humidités relatives (HR) moyennes des régions concernées :

- climat chaud et humide ( $HR \geq 85\%$ ),
- climat chaud à humidité modérée ( $50\% < HR < 65\%$ ),
- climat chaud et sec ( $HR < 40\%$ ).

#### 1.3. facteurs du climat chaud

L'environnement de l'Algérie connaît de grandes fluctuations quotidiennes de température et d'humidité ainsi que des vents persistants. Les figures 1 et 2 représentent les variations de la température et l'humidité durant la période d'été dans la région du Blida.

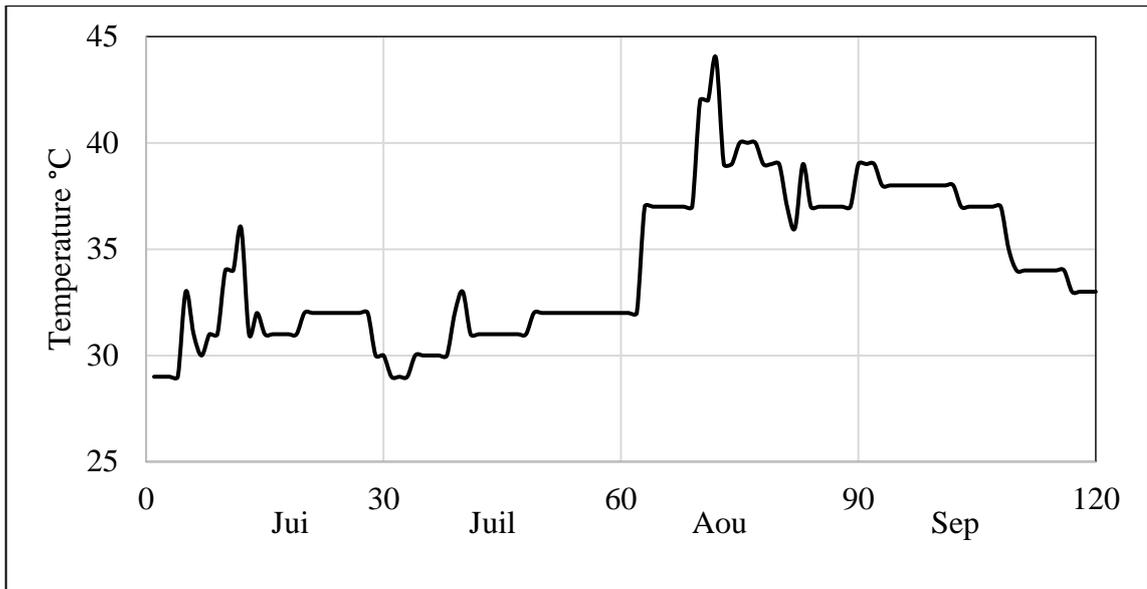


Figure 1.1: Variation des températures dans la région durant la période d'été [4].

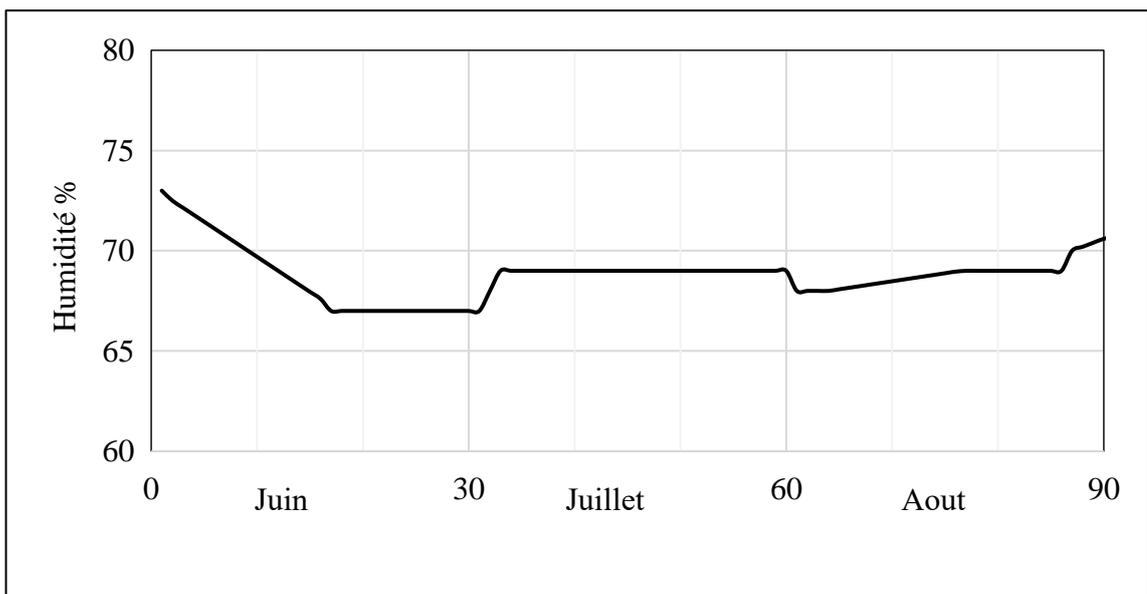


Figure 1.2: Variation de l'humidité dans la région durant la période d'été [4].

Les conditions climatiques ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

### 1.3.1 La température

Les températures élevées sont le milieu favorable à l'évaporation de l'eau du béton et à sa dessiccation. Elles ont également pour effet d'accélérer la prise et le durcissement. Cet

affaiblissement mécanique avec l'évaporation de la température à de plus importantes variations journalières peut induire des contraintes thermiques non négligeables, particulièrement nuisibles durant l'amorce de durcissement [2]. La température en l'Algérie est souvent à 35 °C dans les zones côtières et plus dans le sud qui peut atteindre 50°C durant le mois de mai, juin, juillet et août (les mois les plus chauds de l'année). La température maximale moyenne en été peut s'élever à 45 °C, tandis que le minimum varie de 25 à 35 °C. Lorsque cette température ambiante élevée est associée à environ 11 heures de soleil direct, il est compréhensible que la température de surface du béton et le coffrage puisse être beaucoup plus élevée. En outre, une variation de la température ambiante jusqu'à 20 °C en particulier quand il est jeûne [5].

### 1.3.2 Humidité relative

La notion d'humidité relative (HR), que l'on définit comme la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une température et une pression données. L'humidité relative varie de 0 à 100%.

Des changements radicaux de la température de l'air sont accompagnés par des modifications majeures de l'humidité relative. L'évaporation est d'autant plus forte que cette humidité est faible ; c'est la quantité d'eau que peut théoriquement absorber un béton pour atteindre sa saturation, ou sa capacité restante d'absorption d'eau de l'air. Si la faible humidité relative par temps chaud et sec est susceptible d'entraîner une perte excessive d'eau du béton frais, il faut également se préoccuper dans quelle plage elle peut varier. En effet, d'importantes variations journalières de l'humidité relative sont à l'origine de cycles condensation-séchage pour les surfaces exposées du béton. Cela a des conséquences sur sa durabilité [2].

### 1.3.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques. La température de l'air dépend directement du rayonnement solaire en absence de nébulosité et de pluie. Dans ce cas, le rayonnement direct va provoquer l'élévation de la température des matériaux de base stockés (ciment, granulat et eau). L'ensoleillement induit également à l'élévation de la température des coffrages et des cages d'armatures et le site lui-même, dans lequel se déroule le chantier s'est fortement

réchauffé. Il en résulte une augmentation de température du béton frais. Après la mise en place et le serrage du béton, le rayonnement solaire direct conduit à une évaporation rapide de l'eau des surfaces exposées et fait surgir un risque de fissuration par retrait plastique, ce qui nécessite un mode de cure rigoureux. Par temps chaud, la nébulosité et la pluie diminuent l'effet du rayonnement solaire puisqu'elles en absorbent une partie. En termes de conditions ambiantes, il s'ensuit la diminution de la température et l'augmentation de l'humidité relative. Cela a pour effet de limiter l'évaporation [2].

#### 1.3.4 Evaporation :

Chaque facteur décrit auparavant et pris isolément, contribue à l'évaporation. L'action conjuguée de ces facteurs ne fait donc qu'amplifier ce phénomène et c'est la raison pour laquelle il faut les considérer dans leur ensemble. C'est cet ensemble qui définit le temps, mais surtout son évolution : les changements, tels que la brusque arrivée du vent avec une forte chute de température, sont particulièrement importants. Ce sont des situations météorologiques critiques qui peuvent survenir en été, de juin à septembre dans nos régions.

L'évaporation est le paramètre préoccupant lors du bétonnage par temps chaud. L'évaporation est la conversion de l'eau, de l'état liquide à l'état gazeux, à une température inférieure au point d'ébullition, et sa diffusion dans l'atmosphère. Elle se produit lorsque la surface de l'eau est exposée à un air non saturé. Dans le cas du béton frais, la surface d'eau est créée par le phénomène de ressuage [2]. L'effet combiné de la température, de l'humidité relative et du vent, est généralement estimé par l'abaque présenté sur la figure 1.3 Cette dernière permet de déterminer et d'évaluer un débit d'évaporation de l'humidité superficielle d'un béton (en  $\text{kg/m}^2/\text{h}$ ), connaissant la température ambiante et celle du béton, l'humidité relative de l'air ainsi que sa vitesse de renouvellement. De cet abaque et de l'expérience, il est reconnu qu'à partir d'un débit d'évaporation de  $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ , des précautions sont à prendre pour éviter les risques de fissuration plastique.

Le climat de l'Algérie est varié, car le pays a une très grande superficie: la partie nord possède un climat méditerranéen , alors que le reste du pays possède en majorité un climat désertique . Cependant entre ces deux grands types de climats, existent des climats de transition, notamment le climat semi-aride qui est correspond à un climat méditerranéen avec une sécheresse ne se limitant plus uniquement à la saison estivale mais à une bonne partie de l'année mais aussi un climat méditerranéen aux influences montagnardes, un petit plus continental. Néanmoins, l'Algérie est un pays où le climat dominant est chaud et sec.

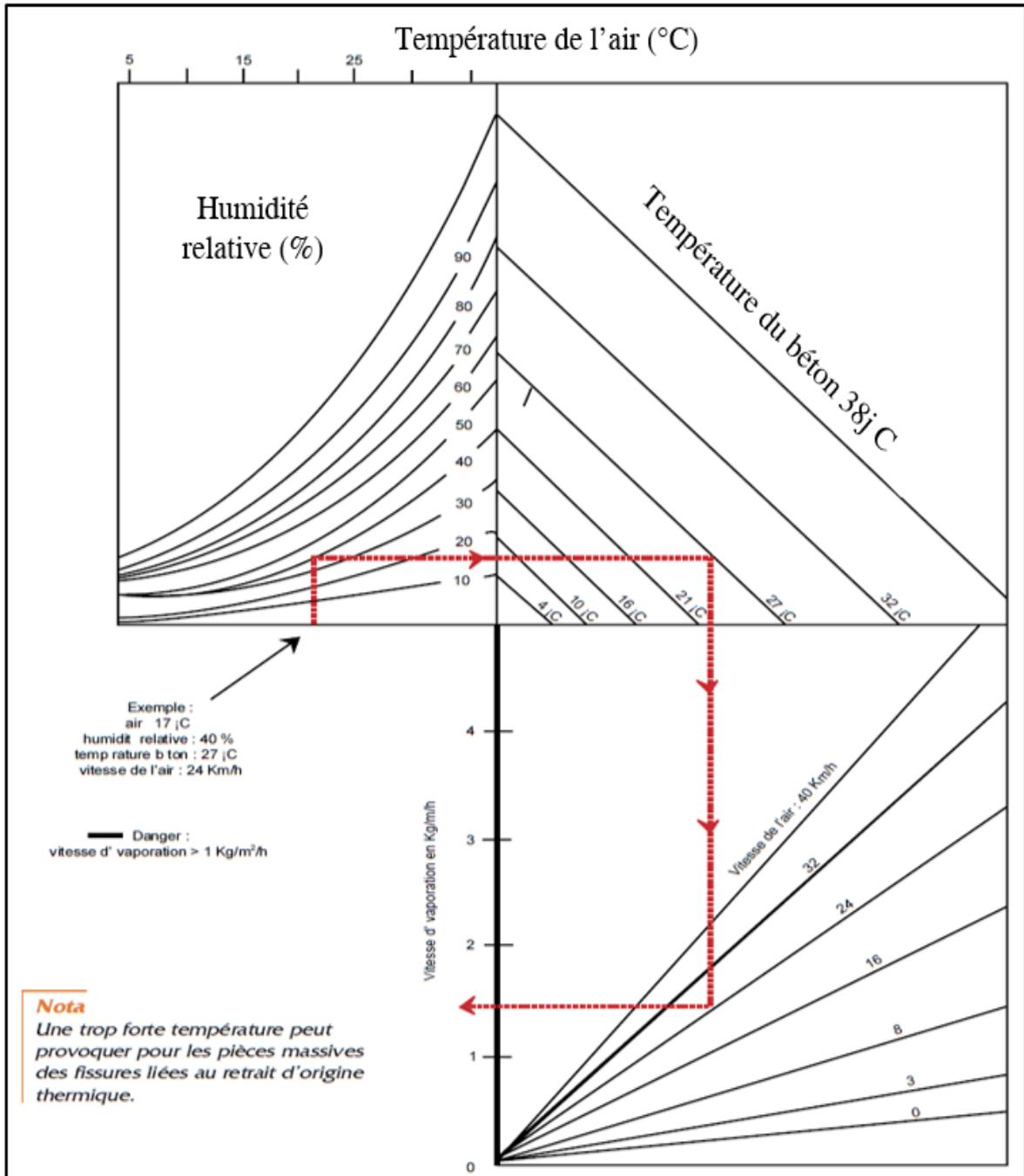


Figure 1.3 : Vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton) [1].

#### 1.4. Effet du climat chaud sur les performances des bétons ordinaires à l'état frais

##### 1.4.1. Ouvrabilité

Le béton possède deux comportements: l'état frais et l'état durci. A l'état frais l'ouvrabilité est la propriété essentielle qui conditionne non seulement sa mise en place pour le

remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. L'ouvrabilité est un facteur très important qui regroupe plusieurs caractéristiques du béton frais telles que la consistance, l'étalement, la capacité d'écoulement, le pompage, la mobilité qui facilite la mise en place dans le coffrage et qui conditionne aussi les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Dans le domaine des liants hydrauliques, désigne l'aptitude plus ou moins grande d'un béton ou d'un mortier en état liquide, à remplir de façon homogène et sans défauts les vides des coffrages. Elle est en fonction d'une multitude de facteurs et donne lieu à des recettes spécifiques de formulations en fonction de l'ouvrage à construire avec l'emploi de granulats et d'adjuvants sévèrement dimensionnés et sélectionnés. Une des grandeurs définissant l'ouvrabilité est la consistance. L'ouvrabilité dépend de plusieurs paramètres : la quantité d'eau, la qualité des granulats et la grosseur des grains. L'ouvrabilité du béton peut être évaluée par le cône d'Abrams, la table à choc, le Vebe et la maniabilité LCPC. La maniabilité est caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams. L'optimisation d'une composition du béton permet d'ajuster le dosage des constituants et surtout le rapport E/C pour une consistance visée. Ce sont des essais d'étude effectués au laboratoire à 20°C. Lorsque la température augmente, elle conduit à une augmentation de la température du béton frais. Cette élévation de température conduit à une accélération du processus d'hydratation qui rend le béton plus ferme dès les premiers instants de sa confection. L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en liaison avec son dosage et sa chaleur massique [6].

Par exemple, on retiendra, toute chose égale par ailleurs, que dans le domaine courant :

- Une augmentation de 10°C du ciment élève de 1°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C de l'eau élève de 2°C la température du béton.
- Une augmentation de 10°C des granulats élève de 7°C la température du béton (Figure 1.4).

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

Mamillan et al. [6] ont montré qu'une augmentation de 11°C de la température du béton entraîne une réduction de l'affaissement de 25 mm et la quantité d'eau afin de compenser cette réduction augmente d'autant plus que la température du béton est plus élevée. Aussi elle entraîne une augmentation de la demande en eau 6.5l/m<sup>3</sup>. Lorsque la température

ambiante augmente, conduisant à une augmentation de la température du béton frais. De ce fait, la quantité d'eau doit nécessairement être augmentée pour maintenir un affaissement donné.

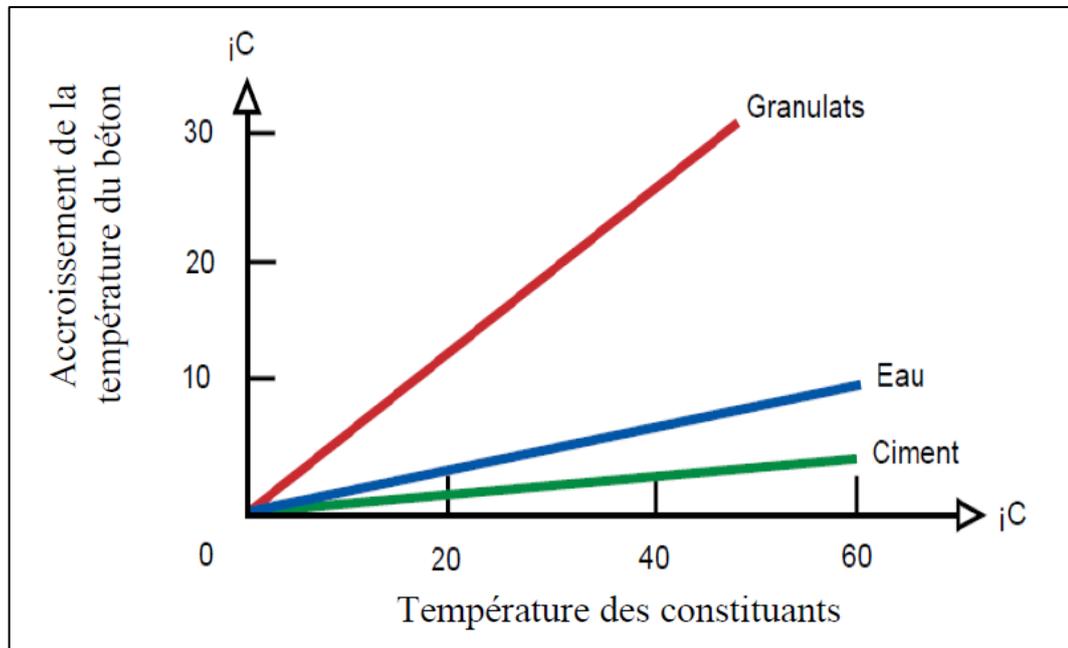


Figure 1.4 : Accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants [6].

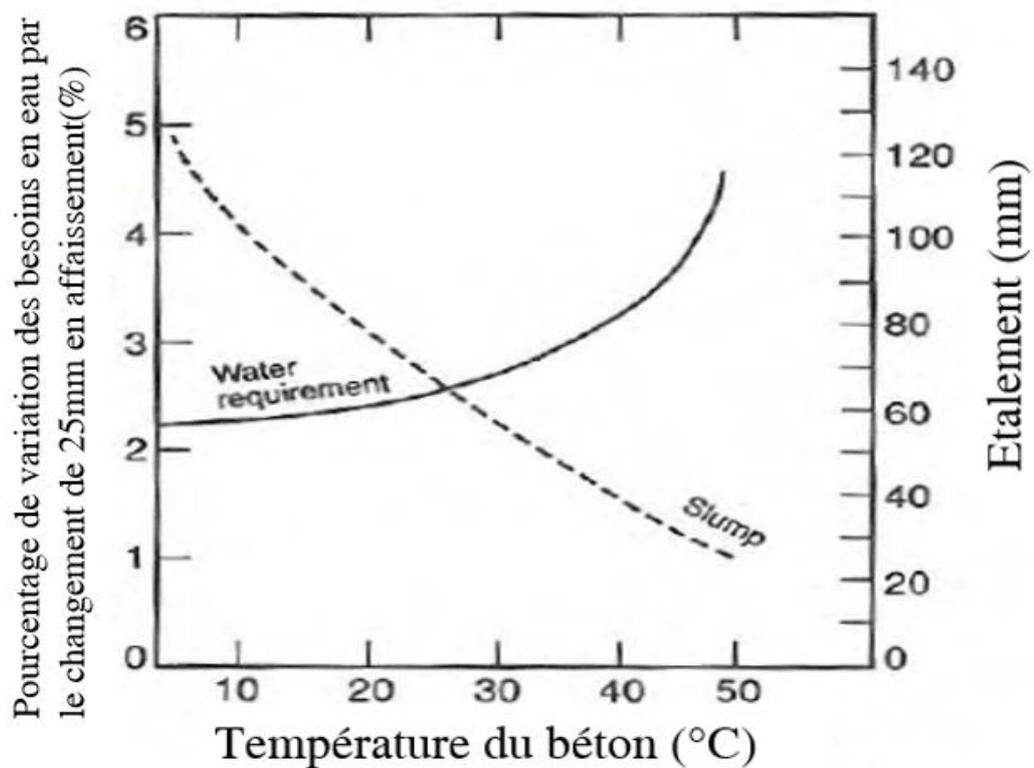


Figure 1.5 : Effet de la température du béton sur l'affaissement et la quantité d'eau nécessaire lorsque l'affaissement varie de 25mm [6].

Hampton [7] montre que l'élévation de la température ambiante de 22°C à 32°C entraîne une perte de l'affaissement et contribue à l'élévation de la température du béton, quelle que soit la gamme de consistance étudiée (Figure 1.6).

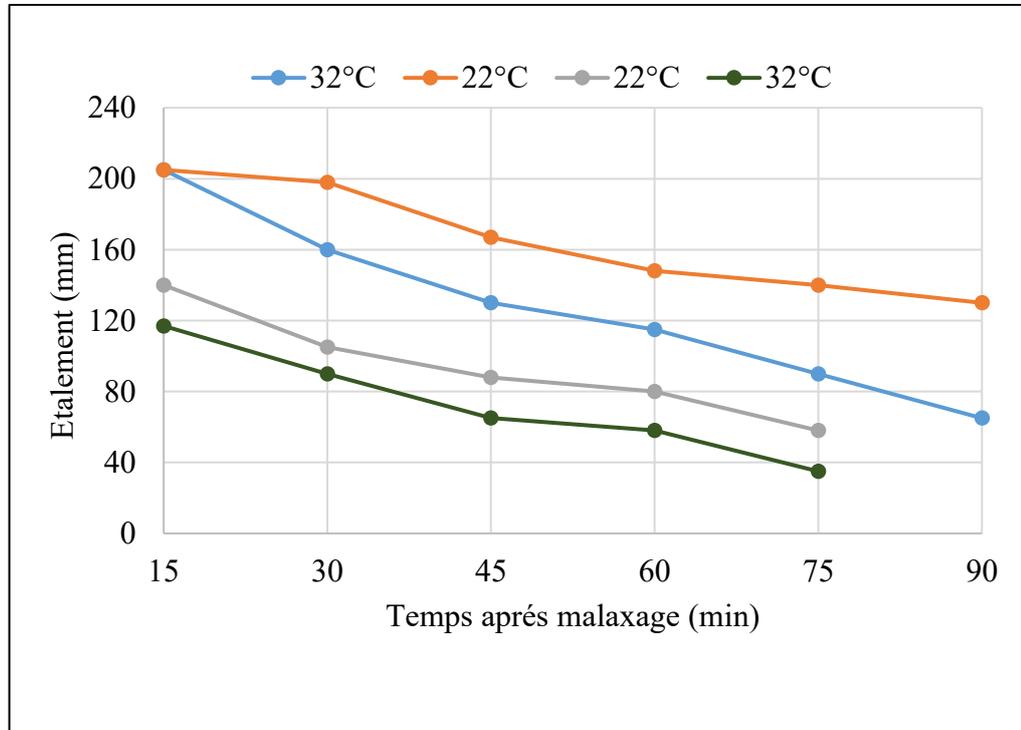


Figure 1.6: Effet de la température sur la perte d'affaissement des bétons plastique coulé à une température de 22°C et 32°C [7].

#### 1.4.2. Temps de prise

C'est le temps de cohésion de la pâte de ciment et le passage de l'état fait à l'état solide. Lors de ce passage on distingue deux repères : le temps de début de prise et le temps de fin de prise. Ces repères sont déterminés à l'aide de l'essai de Vicat [8].

Par temps chaud, l'élévation de la température du béton a pour effet de diminuer le temps de début et de fin de prise, et donc réduire la période pendant laquelle le béton peut être mis en œuvre. Donc les réactions chimiques entre le ciment et l'eau sont thermo-activées. Sa vitesse est plus rapide lorsque la température s'élève (Figure 1.7) [2].

Ahmadi [9] a observé que lorsque la température augmente, il y aura une diminution dans le temps initial de prise du béton. Avec l'augmentation de l'humidité sur le terrain, le temps de prise initial de béton augmente. L'augmentation de la vitesse d'air sur le terrain, implique une diminution du temps de prise initiale du béton (Figure 1.8). L'auteur rapporte des effets similaires de temps de fin de prise à ceux de temps de prise initiale du béton (Figure 1.9).

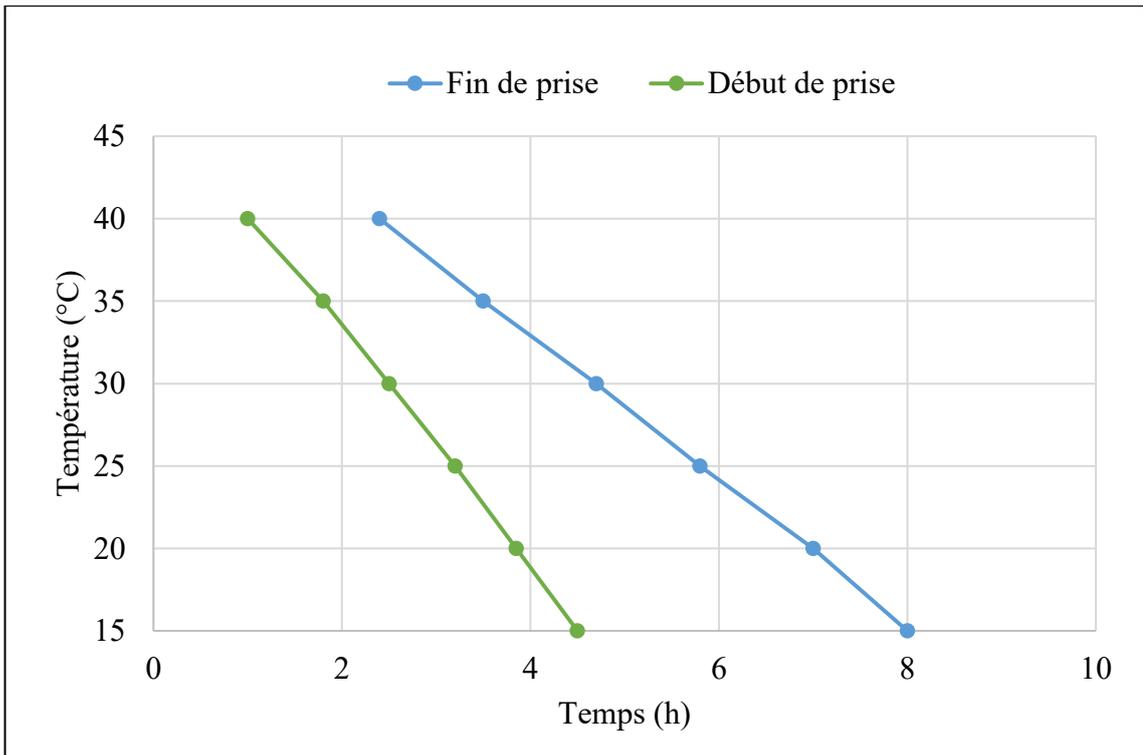


Figure 1.7 : Effet de la température sur le temps de début et fin de prise [2].

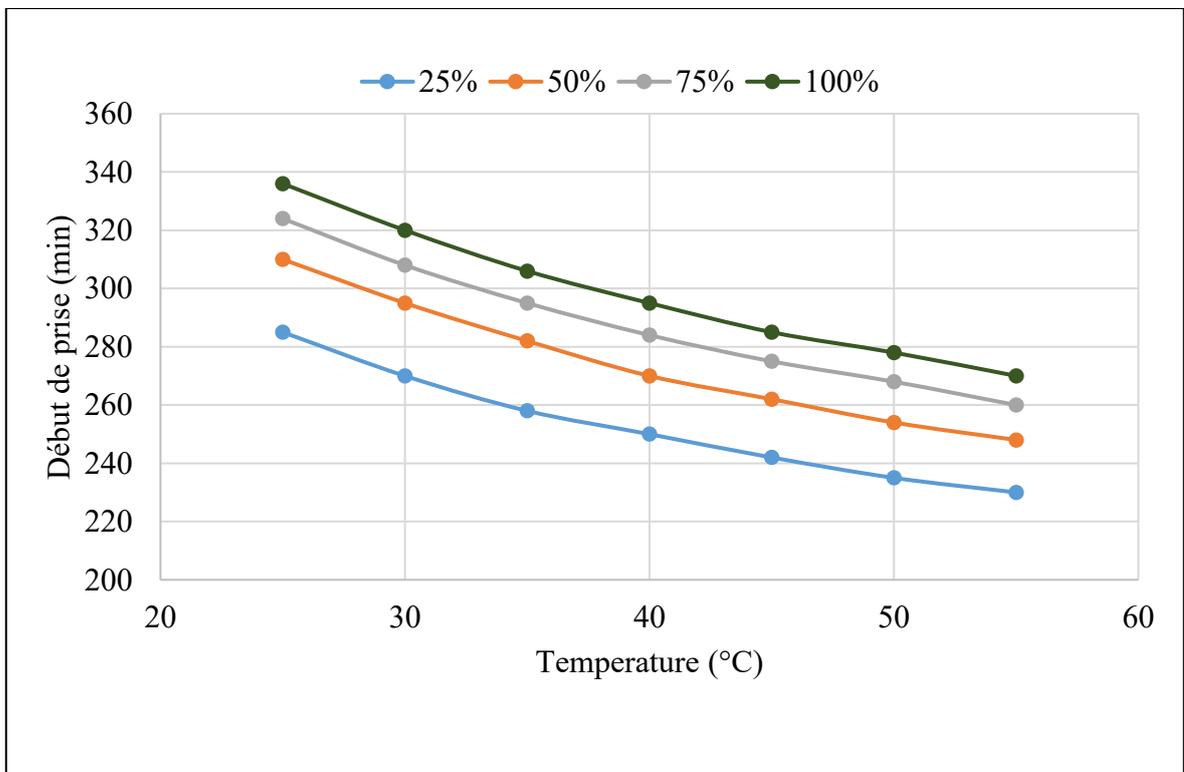


Figure 1.8: Effet de la température sur le temps de début de prise [9].

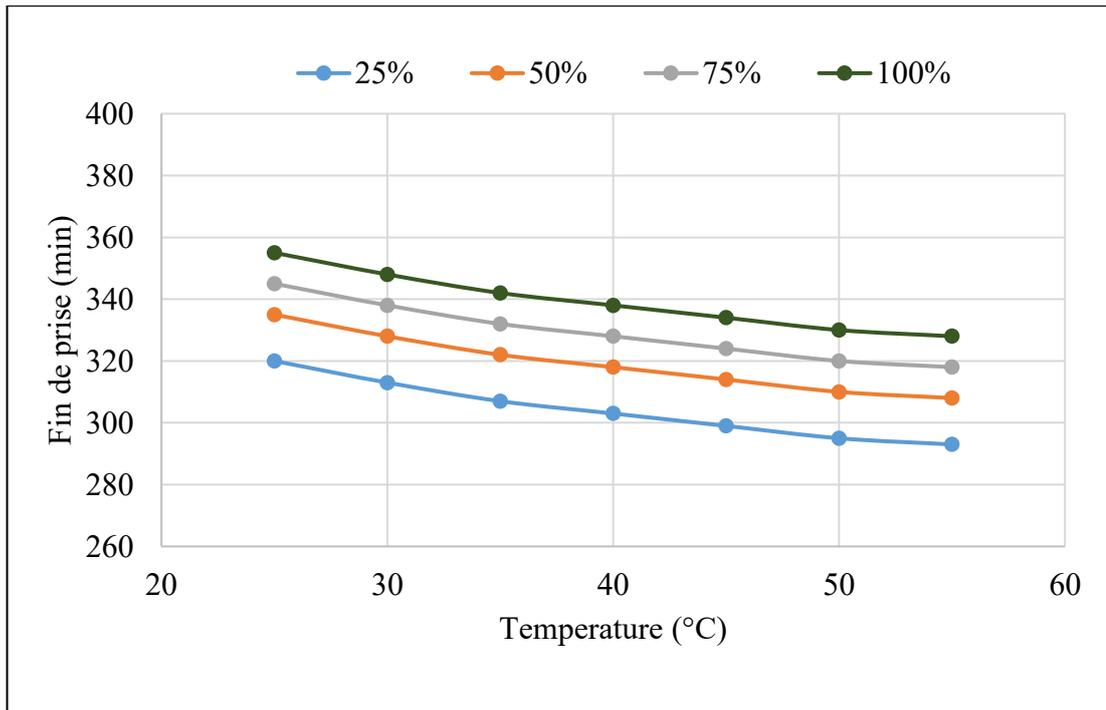


Figure 1.9: Effet de la température sur le temps de fin de prise [9].

## 1.5. Effet du climat chaud sur les performances des bétons ordinaires à l'état durci

### 1.5.1 Résistance à la compression

La résistance du béton dépend de plusieurs paramètres tel que la pâte de ciment, les granulats, la liaison pâte granulat et la concentration granulaire dans le béton. Mouret et al. [2] ont montré que dans un béton ordinaire, les propriétés mécaniques des granulats sont supérieures à celle de la pâte de ciment. La résistance du béton dépendra de la résistance de la pâte et sa liaison au granulat. La pâte de ciment est liée à sa structure poreuse, ses propriétés dépendent du rapport E/C et du degré d'avancement des réactions d'hydratation

Selon Soroka [10], la température élevée et le possible départ d'eau par évaporation selon la valeur de l'humidité relative exercent des actions opposées sur les propriétés mécaniques du béton, dès le jeune âge. Ramezani pour et Malhotra [11] ont observé que le gain de résistance initiale obtenu par les bétons durcis à 38 °C et 65% d'humidité relative en comparaison avec celle des bétons durcis sous cure humide ne sont pas maintenus à long terme. Les résistances à la compression à 180 jours sont significativement plus faibles que la résistance des bétons durcis dans une cure humide (Figures 1.10-113). L'absence de durcissement du béton dans une cure humide affecte négativement sa résistance à la pénétration des ions de chlore et cela affecte sa résistance à la compression.

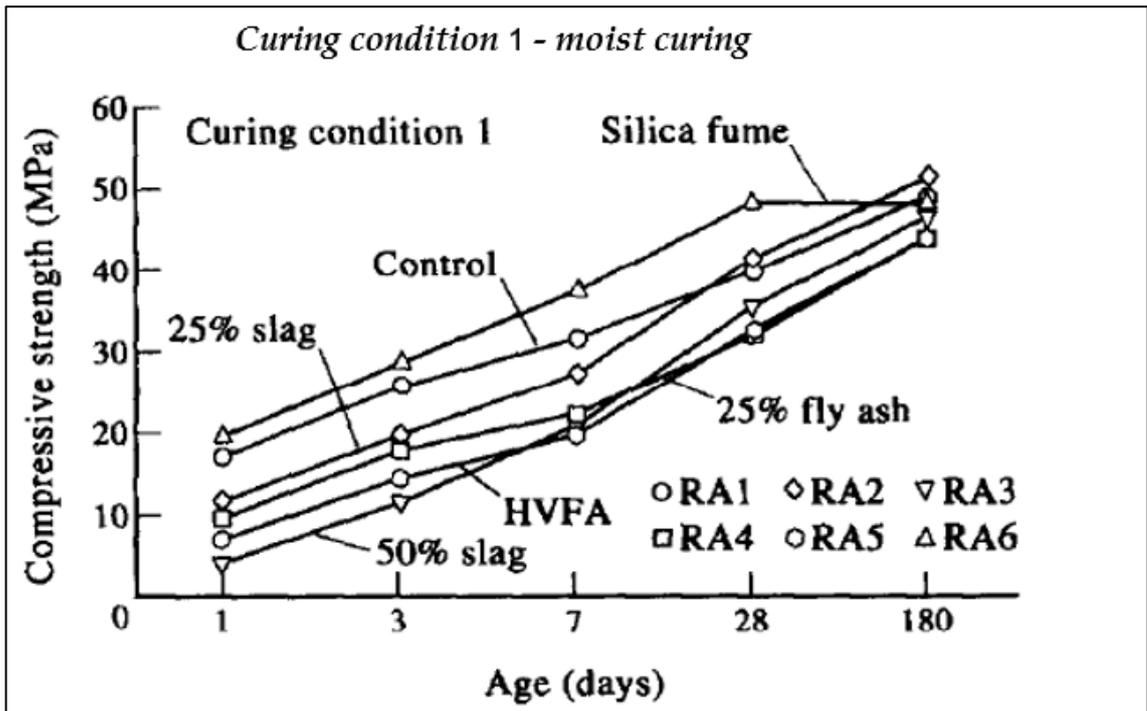


Figure 1.10: Développement de la résistance à la compression du béton dans la cure humide [11].

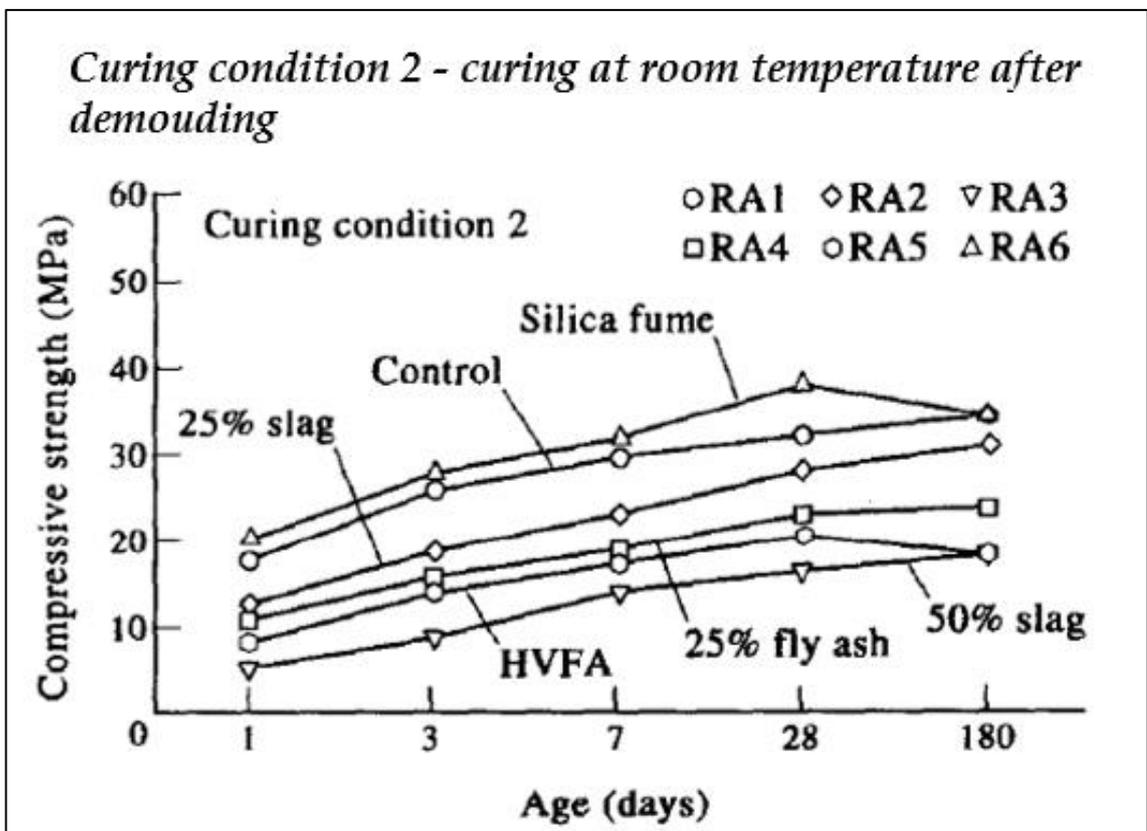


Figure 1.11: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après démoulage [11].

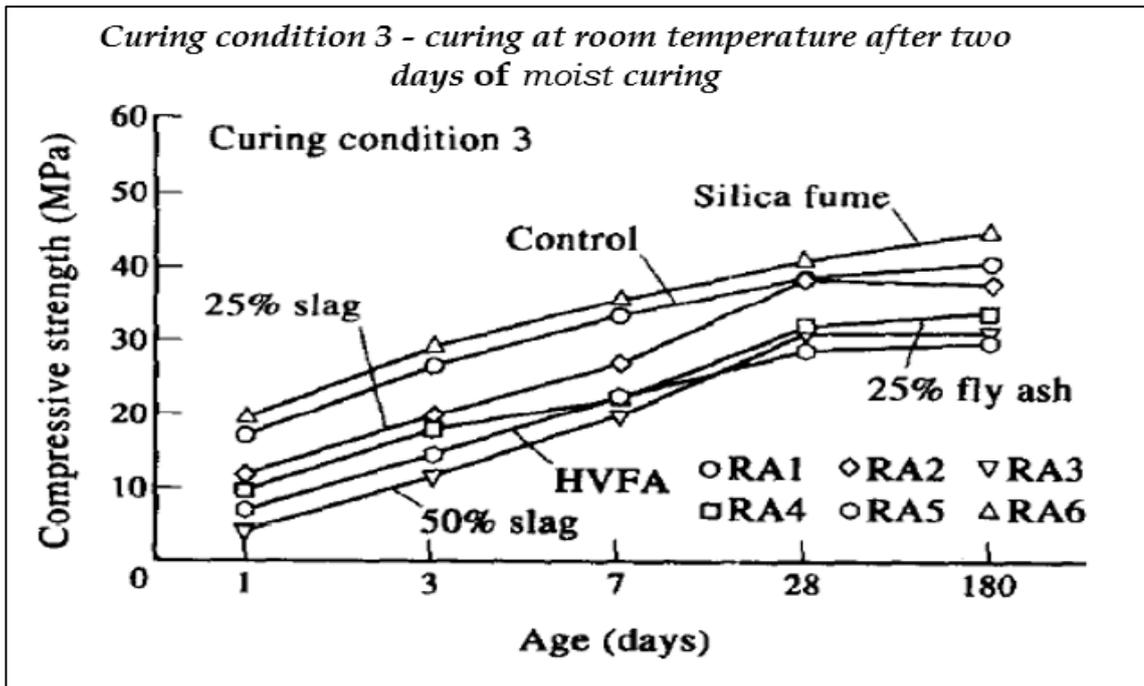


Figure 1.12: Développement de la résistance à la compression du béton conservée dans une chambre climatique après deux jours de cure humide [11].

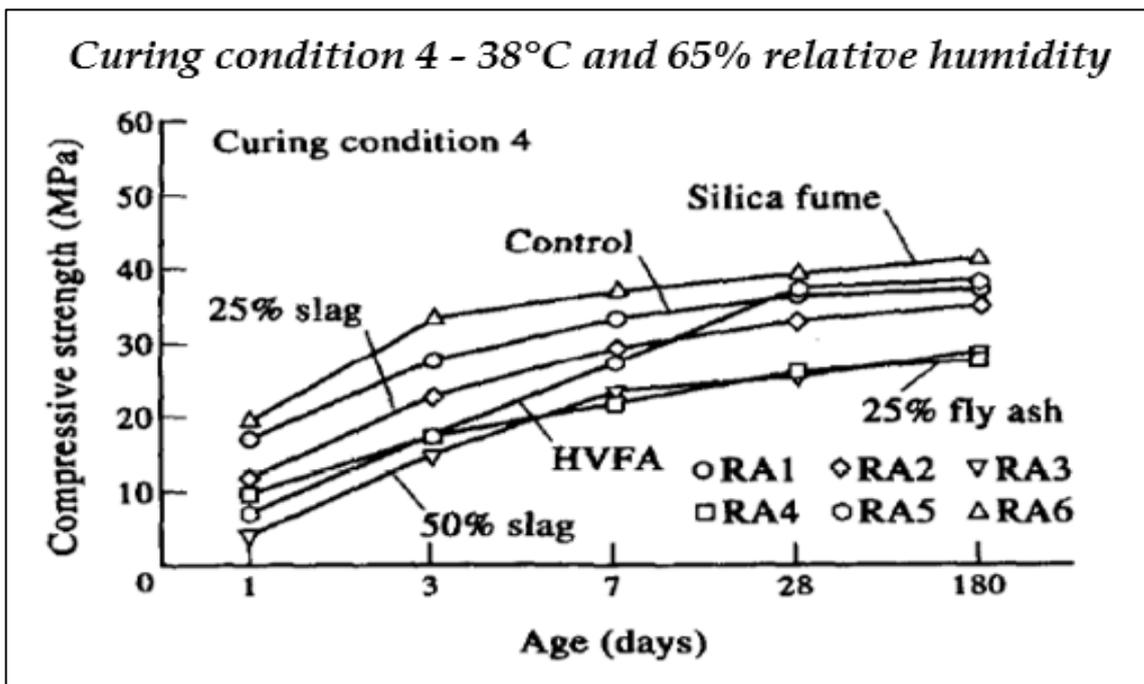


Figure 1.13: Développement de la résistance à la compression du béton conservé à une température de 38°C et 65% d'humidité [11].

Shoukry et al. [12] ont montré un effet similaire de l'effet de l'augmentation de température qui donne une réduction de la résistance du béton à la compression, à la traction ainsi que le module d'élasticité correspondant (Figure 1.14). La cure du béton provoque une augmentation de résistance à la compression du béton, à la traction et le module d'élasticité

correspondant (Figure 1.15). Il est recommandé lors de la conception des structures en béton de prendre en compte la variabilité des propriétés du béton avec les variations de température et d'humidité qui pourraient influencer sur le comportement structurel, la résistance et la rigidité.

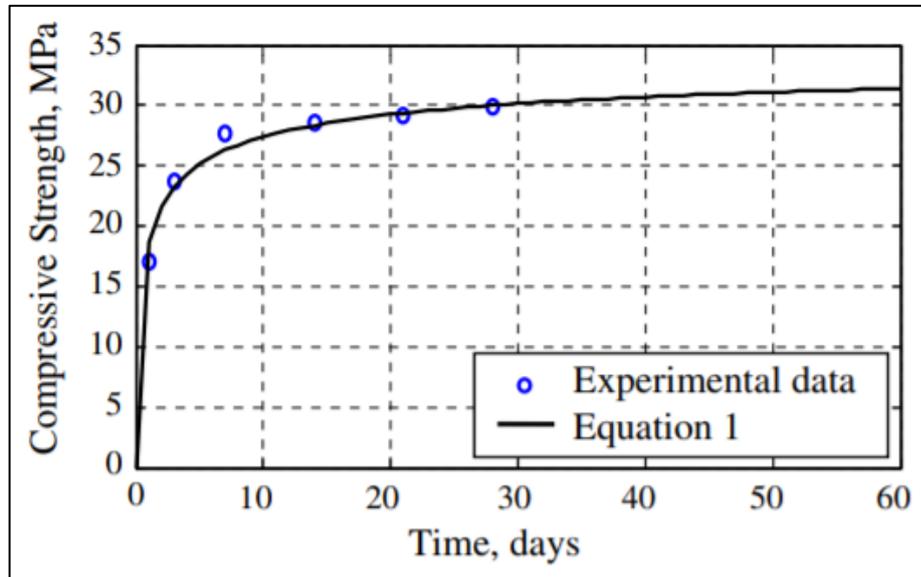


Figure 1.14: Gain de la résistance à la compression [12].

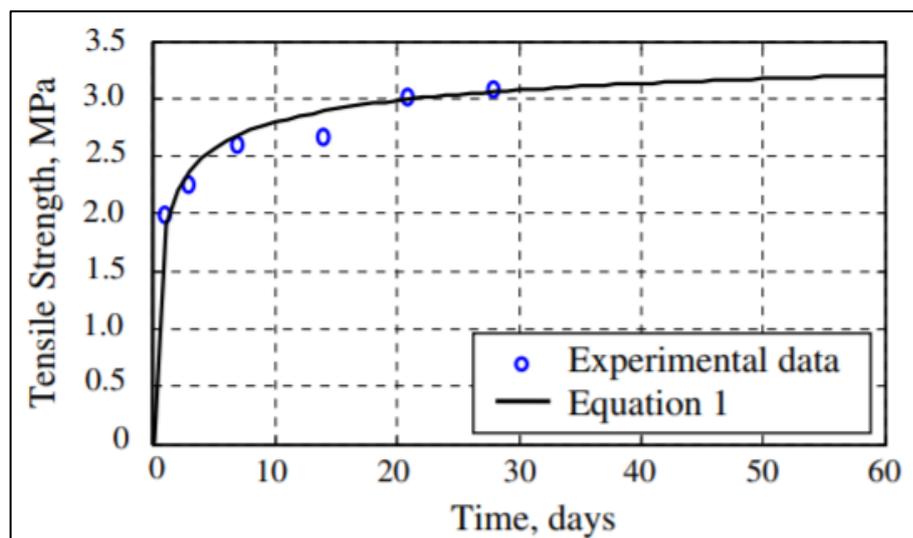


Figure 1.15: Gain de la résistance à la traction [12].

D'après Al-Ani et al. [13], le retard de cure du béton par temps chaud a un effet négatif sur la résistance à la compression, et le premier jour de retard de cure a le plus grand effet. La cure initiale est plus efficace pour les bétons avec un dosage de ciment élevé. Une période minimale de cure de 3 jours est suffisante par temps chaud, tandis qu'une période de cure minimale de 7 jours est nécessaire pour le béton avec faible teneur en ciment.

### 1.5.2. Retrait plastique

Le retrait du béton est défini comme une déformation volumique du matériau, au cours de son durcissement, induite par des phénomènes physicochimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. A l'état frais, le retrait plastique se manifeste suite à une évaporation trop rapide de l'eau du béton entraînant ainsi, quelques heures après le décoffrage, des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à  $1\text{kg/m}^2/\text{h}$ . elle est d'autant plus importante que :

- La température ambiante est élevée,
- La température du béton augmente,
- L'air est sec [1].

Le retrait plastique, appelé aussi retrait avant prise ou retrait capillaire, est une déformation qui se manifeste tant que le béton est plastique, à un moment où la pâte est encore déformable. Donc avant et/ou pendant la prise et sous l'effet d'une dessiccation ou d'une auto-dessiccation; une fissuration à la surface externe de l'ouvrage peut se former après le placement ou durant la finition. L'importance du retrait plastique est influencée par la vitesse de dessèchement qui dépend à son tour de la température de l'air et du béton, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Les fissures apparaissent dans le béton lorsque le retrait empêché dépasse sa capacité de déformation. Une grande partie des bétons est destinée aux applications horizontales comme les dalles, d'où un faible rapport volume sur surface et donc un retrait plastique élevé.

Selon Al-Amoudi et al. [14], le retrait plastique augmente avec l'augmentation du dosage de la fumée de silice de (5%, 7,5% et 10% en poids de ciment).

Asamoto et al. [15] montrent que la fissuration qui est due au retrait peut être accélérée par le rayonnement solaire qui favorise le séchage de la surface du béton et diminue le degré d'hydratation. L'application de la cure humide diminue le retrait plastique des bétons. La différence entre la température du béton frais et la température ambiante provoque l'augmentation de ce dernier [16].

### 1.5.3. Perméabilité aux ions chlore

Al-Khaja [17] rapporte qu'une augmentation significative de la pénétration des chlorures dans le béton n'a été observée que lorsque la température de l'exposition a été augmentée de 20 à 45 °C, en particulier à des faibles profondeurs. Toutefois, à des profondeurs supérieures

à 45 mm, l'augmentation de la température a un effet négligeable. L'effet de la température sur la pénétration des chlorures est plus prononcé dans le béton ordinaire que dans le béton à haute résistance. L'augmentation de la diffusion des chlorures dus à la température élevée peut être considérée comme un facteur important affectant la durabilité du béton, vis-à-vis de la corrosion des armatures. L'auteur a réalisé des essais d'immersion sur deux types de bétons, un ciment portland ordinaire OPC (C3A : 10 %, C4AF : 10,1 %) et un ciment Portland à Haute Résistance aux Sulfates SRPC (C3A : 2,8 %, C4AF : 12,2 %). Les rapports E/C sont de 0,39 (béton à haute résistance) et de 0,48 (béton ordinaire). Les bétons ont été conservés à température ambiante pendant 28 jours, ensuite ils ont été maintenus dans une solution de chlorure de sodium à 5 % en masse aux températures 20 et 45 °C pendant 180 jours. L'auteur a constaté que pour tous les rapports E/C, l'augmentation de la température d'essai accélère la pénétration des chlorures dans le béton (Figure 1. 16).

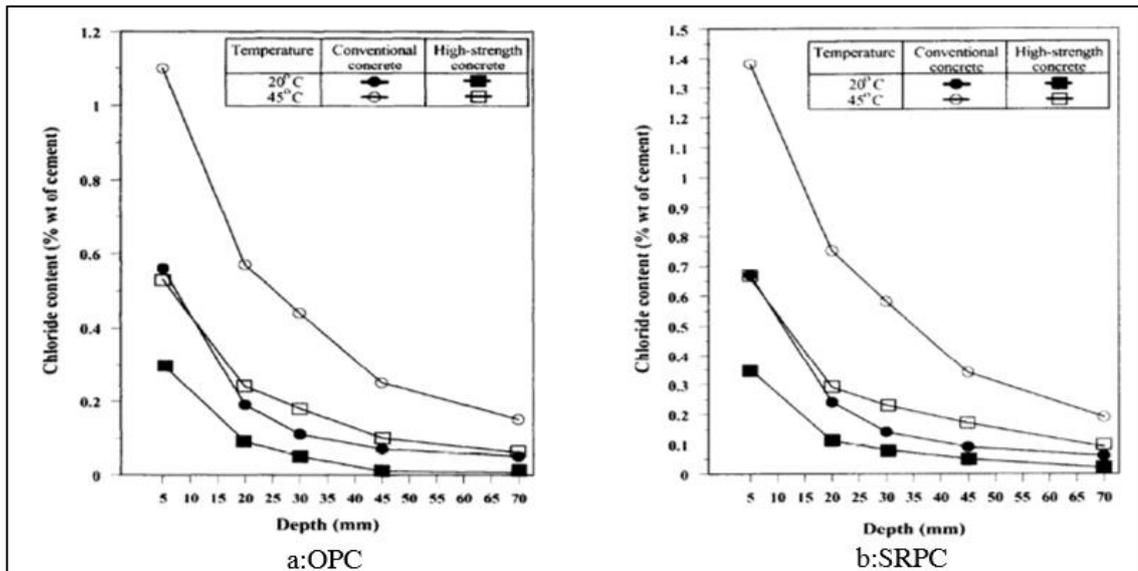


Figure 1.16: Influence de la température d'exposition sur la pénétration des chlorures dans le béton [17].

Bastidas-Arteaga et al. [18] ont expliqué l'augmentation initiale de la corrosion pour les structures proches de la mer par le fait que des structures placées dans un environnement marin tropical sont exposées tous les temps à des chlorures, à des températures et humidité élevées ce qui accélère la pénétration des ions chlore dans béton. Cet effet est plus sensible à l'environnement tropical parce que les grandes valeurs de température et d'humidité réduisent le temps de corrosion initial. Jooss and Reinhardt [19] ont montré qu'il y a une variation considérable de la diffusion des ions chlore selon les types de béton et le type de cure. La diffusion augmente de 10 à 21% pour une augmentation de température de 20 à 50° C et 8 à 21% pour 50 à 80° C. Page et al. [20] ont analysé l'influence de la température sur

la diffusion de chlorures dans les pâtes de ciments Portland pour plusieurs rapports E/C. Les pâtes sont conservées dans une solution de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  à 22 °C pendant 2 mois, puis dans des solutions à différentes températures. Le coefficient de diffusion effectif augmente avec la température d'essai (Tableau 1. 1).

Tableau 1.1 : Influence de la température sur le coefficient de diffusion des chlorures [20]

| Température | $D_{\text{eff}} \times 10^{13} \text{ m}^2/\text{s}^{-1}$ |         |         |
|-------------|---|---------|---------|
|             | E/C=0.4   | E/C=0.5 | E/C=0.6 |
| 7 °C        | 11,03   | 20,7    | 51,9    |
| 14.5°C      | 12,7  | 23,6    | 84,6    |
| 25°C        | 26,0  | 44,7    | 123,5   |
| 35°C        | 44,7  | 94,8    | 165,2   |
| 44°C        | 84  | 183,6   | 318,2   |

#### 1.5.4. Absorption capillaire

Kockal et Turker [21] ont montré que les coefficients de capillarité sont très élevés pour les bétons conservés dans un environnement naturel pour tous les taux de substitution en laitier et cendres volantes. Tasdemir [22] a étudié les effets combinés des additions et des conditions de cure sur la sorptivité et la résistance à la compression du béton de CEMII 42.5. Il a évalué le coefficient de sportivité pour des bétons contenant des ciments avec les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF). Il a aussi étudié le coefficient de sorptivité et la résistance à la compression des bétons avec CEMII 32.5. Il a prouvé que les additions minérales sont bénéfiques pour l'augmentation de la résistance et la réduction de l'absorption capillaire.

#### 1.6. Conclusion

Cette partie de l'étude bibliographique a mis en évidence que le temps chaud est apparu comme étant un phénomène complexe par le nombre important de facteurs climatique à considérer. La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts d'agents agressifs et les mouvements d'eau à l'intérieur d'un réseau poreux. Les recherches ont rapporté qu'un béton contenant des additions minérales de type laitiers, cendres volantes ou fumée de silice conduit à une porosité plus fine et cause du développement de réaction pouzzolanique des additions.

## CHAPITRE II :

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: BETON AUTOPLAÇANT ET EFFET DU CLIMAT CHAUD SUR LES PERFORMANCES DES BAP

#### 2.1. Généralités

Ce chapitre présente une synthèse de l'étude bibliographique sur le comportement des bétons autoplaçants (BAP) sous l'effet du climat chaud. Il présente également les propriétés mécaniques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci ainsi que l'influence des additions minérales sur sa durabilité

#### 2.2. Définition, avantages et inconvénients des BAP

Le béton autoplaçant BAP est un béton très fluide, homogène, qui se met en place sous le seul effet de la gravité et sans énergie de compactage supplémentaire, il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport ; du pompage et de la mise en œuvre. Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. En effet, les bétons traditionnels subissent un certain foisonnement lors du transport et de la mise en œuvre et nécessitent, en général, un apport d'énergie (sous la forme d'une vibration interne ou externe) permettant d'évacuer l'air emprisonné dans le matériau et leur capacité à cheminer dans les coffrages tout en conservant leur homogénéité et leur compacité.

La qualité de matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé). La pose des BAP est optimisée par leur fluidité.
- Tous les coins des coffrages sont remplis et, surtout, il y a moins de problèmes d'hétérogénéité dans la dispersion du béton. Ils permettent donc des coffrages complexes et anguleux.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.

- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Meilleur enrobage des armatures.
- Réalisation de formes complexes et/ou de grande hauteur fluidité obtenue sans excès d'eau garantissant l'homogénéité du béton et l'obtention de résistances.
- Bonne qualité de remplissage (même en cas d'accès difficile).
- Bonne qualité de parement sous réserve de précautions de mise en œuvre.
- Suppression de la vibration : amélioration des conditions de travail des compagnons (santé et sécurité).

Le béton autoplaçant offre aussi des avantages socio-économiques :

- La main d'œuvre nécessaire est diminuée
- Les dispositifs de vibration ne sont pas nécessaires
- La réduction du temps de bétonnage.

Toutefois, certains points restent à contrôler dans l'utilisation du BAP: La formulation des BAP implique un dosage délicat des matières premières tel que (ciment, adjuvant et des différentes additions minérales). Il faut aussi noter l'augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, La fluidité des BAP nécessite des coffrages étanches et le risque de la non compatibilité des matériaux.

### 2.3. Formulation des BAP

La formulation des BAP est un domaine de recherche très vaste, la fluidité c'est le paramètre le plus important dans le BAP et qui est également son plus grand inconvénient car la dispersion des particules les plus fines (ciment, addition) par un superplastifiant conduit à une matrice tellement fluide qu'elle se sépare des inclusions granulaires les plus grosses (sable, gravillon) [23]. L'écoulement du béton dépend des matériaux utilisés. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant. Chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, durabilité).

Pour l'optimisation de la formulation des BAP, plusieurs approches ont été conçues à savoir: l'approche japonaise d'Okamora (1999), l'approche française LCPC, l'approche suédoise

du CBI par Peterson et al. [24] qui est basée sur le plan d'expérience et celle de d'OH et al. [25] qui repose sur la théorie de l'excès de pâte [26].

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement varier d'une approche à l'autre. La formulation des BAP repose sur trois critères.

- Fluidification de la pâte: elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.
- Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.
- Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice) [27].

Les différentes approches qui ont été élaboré à travers le monde pour concevoir des bétons autoplaçants ont abouti à des formulations de bétons ayant un volume de pâte plus important que celui des bétons ordinaires (pour des résistances mécaniques égales). En effet, la présence de la pâte (mélange du ciment, des adjuvants, de l'eau efficace et des additions minérales) remplit les vides et écarte les granulats, minimisant ainsi les frictions et les frottements. Ceci a pour conséquence d'améliorer l'ouvrabilité et l'écoulement du béton. Les BAP contiennent donc une quantité moins importante de gravier, et beaucoup plus de fines particules (inférieures à 80 microns). Les additions minérales de type filler calcaire, cendre volante, fumée de silice, laitier,... etc, ont gardé leur rôle comme substituant partiel du ciment dans les BAP.

La réalisation d'un BAP est devenue de ce fait une opération plus complexe que celle d'un béton ordinaire traditionnel. En effet, il s'agit de combiner un nombre plus élevé de matériaux, opération accompagnée d'éventuels problèmes de compatibilité entre matériaux (ciment - adjuvants, adjuvant – adjuvant).

La formulation des BAP par l'approche Okamura qui été développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Les adjuvants jouent un rôle très important dans la confection des BAP en réduisant le rapport eau sur ciment (E/C) du béton. Les plastifiants ou les superplastifiants confèrent au béton une grande fluidité en augmentant considérablement l'étalement. Ils s'adsorbent à la surface des particules de ciment et agissent par effets stérique et électrostatique pour disperser ces particules. En se fixant sur les grains de ciment, elle modifie la nature des charges électriques. Cette fonction diminue d'une part le phénomène de floculation du ciment au contact de l'eau, et augmente d'autre part la proportion d'eau libre dans la suspension, Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entoure d'un film d'eau très mince [28].

#### 2.4. Caractérisations des BAP à l'état frais

La formulation d'un béton autoplaçant est essentiellement focalisée sur l'obtention des propriétés à l'état frais qui sont essentielles pour assurer leurs performances souhaitées. C'est pour cela que de nombreuses recherches visent également au développement de techniques de caractérisation du critère autoplaçant. Il est nécessaire de caractériser les matériaux locaux à travers plusieurs essais. Ainsi, un ensemble de tests combinés a été mis en place pour pouvoir satisfaire tous les essais de l'écoulement du béton. Diederich [23] rapporte dans sa thèse que nombreux essais ont été développés et regroupés sous la forme de recommandations par l'AFGC dans le cadre du Projet National Béton Autoplaçant (AFGC, 2008). Ces recommandations ont finalement conduit à l'écriture d'une norme européenne EN 206-9, Règles complémentaires pour le béton autoplaçant datant de novembre 2014 (NF EN206-9) [29].

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales:

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams)
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L)
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis) [30].

##### 2.4.1. Essai d'étalement

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné. Un échantillon de béton dans un cône d'Abrams est maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée. Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton. L'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en

utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtes perpendiculaires [30].

#### 2.4.2. Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On tire la trappe et on laisse le béton s'écouler travers l'espace entre armatures. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1. Un béton autoplaçant possède un taux de remplissage H2/H1 supérieur ou égal à 0,8. Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation [30].

#### 2.4.3. Essai de V funnel

L'essai d'écoulement au V-funnel permet de mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe. Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [31].

#### 2.4.4. Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il complète l'essai de la boîte en L. Cet essai consiste à prélever un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de  $4.8 \pm 0.2$  kg de béton et laissé deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{\text{masse de laitance}}{\text{masse de l'échantillon}} \quad 2.1$$

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0% < % Laitance < 15 %) Stabilité satisfaisante
- 15% < % Laitance < 30 %) Stabilité critique
- % Laitance > 30%) Stabilité très mauvaise [30].

## 2.5. Rhéologie des bétons autoplaçants

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. La rhéologie est définie comme étant la science de l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées, variables au cours du temps [32]. La connaissance du comportement rhéologique est essentielle pour caractériser l'écoulement d'un béton, qui permet de caractériser le comportement du béton au cours de la mise en œuvre et d'analyser l'écoulement en étudiant les contraintes et les déformations subies par le matériau. L'exploitations des paramètres rhéologiques conduit à l'élaboration des courbes d'écoulement qui relie la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) à la vitesse de cisaillement ou le gradient de vitesse, notée ( $\dot{\gamma}$ ) [31].

### 2.5.1. Loi de comportements rhéologiques

On distingue plusieurs types de comportements rhéologiques qui se divisent en deux grandes familles : les fluides newtoniens et les fluides non- newtoniens.

#### 2.5.1.1. Fluides newtoniens

On appelle un fluide newtonien dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire. La constante de proportionnalité est appelée viscosité . Autrement dit sa viscosité ne dépend pas des contraintes qui lui sont appliquées. Donc elle est constante quelques soient les contraintes exercées [32,33].

D'où on peut écrire la relation qui décrit son comportement rhéologique comme suit :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad 2.2$$

Avec :

$\tau$  : la contrainte de cisaillement [Pa]

$\mu$  : la viscosité [Pa.s]

$\dot{\gamma}$  : le taux de cisaillement [1/s].

#### 2.5.1.2.Les fluides non-newtoniens

Un fluide est dit non newtonien lorsque le tenseur des contraintes visqueuses n'est pas une fonction linéaire du tenseur des taux de déformation. Les trois fluides non – newtoniens les

plus fréquemment recommandés sont : fluides Binghamien, les rhéofluidifiants, les fluides rhéoépaississants, etc.

Le corps non newtonien il s'agit de corps complexes exclusivement visqueux ou viscoplastique ayant des lois de comportement non linéaires, qui nécessitent une contrainte minimale pour s'écouler.

- Fluide Binghamien

Le comportement non-newtonien est caractérisé par l'existence d'une contrainte (seuil d'écoulement). Si la contrainte appliquée au fluide est inférieure à cette contrainte seuil, aucune déformation ne se produit, le fluide ne coule pas. La viscosité des fluides non-newtoniens n'est pas forcément constante, elle dépend aussi de la contrainte de cisaillement exercée [31-33] et qui sont représentés par la loi suivante:

$$\tau = \tau^0 + \mu \gamma' \quad 2.3$$

Avec :

- $\tau$  : Contrainte de cisaillement (Pa) ;
- $\tau^0$  : Le seuil de cisaillement (Pa) ;
- $\gamma'$  : Le gradient de vitesse (s-1) ;
- $\mu$  : viscosité plastique de Bingham (Pa.s).

- Fluide rhéofluidifiant :

Ce type de fluide est représenté par un rhéogramme qu'on peut le voir sur la figure 2.1 dont la concavité est tournée vers le bas. La viscosité de ces fluides diminue si la contrainte de cisaillement augmente ou si la vitesse de déformation augmente. Donc le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement augmente [34,35].

- Fluide rhéoépaississant :

On appelle un fluide rhéoépaississant lorsque sa viscosité augmente en fonction de l'augmentation de la contrainte de cisaillement (ou la vitesse de déformation). Ainsi, le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement augmente. La concavité est représentée par un rhéogramme tournée vers le haut [34,35]. Les lois de comportement de ces fluides sont regroupées dans la figure (2.1).

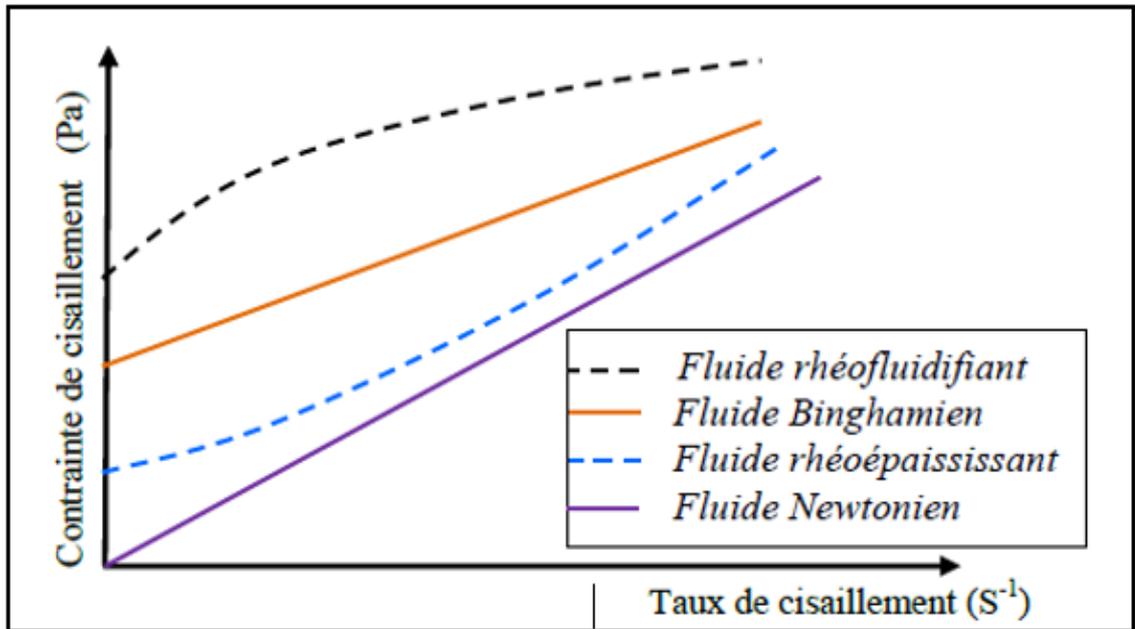


Figure2.1: Les différents comportements rhéologiques des fluides [34].

Plusieurs chercheurs ont étudié les modèles rhéologiques, il existe plusieurs lois de comportement rhéologique des différents matériaux qui sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Modèles de comportement rhéologique des fluides [33]

| Auteurs                 | Loi de comportement                            |
|-------------------------|--|
| Newton (1687)           | $\tau = \mu \dot{\gamma}$                      |
| Bingham ( 1922)         | $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$             |
| Herschel Berkley (1926) | $\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$             |
| Ostwald(1925)           | $\tau = A \dot{\gamma}^n$                      |
| Von-berg (1977)         | $\tau = \tau_0 + b \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/c)$ |
| Sisko (1970)            | $\tau = a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^c$       |
| Robertson-Sttif (1977)  | $\tau = A(\dot{\gamma} + B)^c$                 |
| Eyring(1935)            | $\tau = a \sinh (b \dot{\gamma})$              |

Avec :

$\tau$  : Contrainte de cisaillement

$\tau_0$  : Seuil cisaillement

$\dot{\gamma}$  : Taux de cisaillement

$\mu$  : Viscosité plastique

### 2.5.1.3. Thixotropie

Un fluide est dit thixotrope si sa viscosité diminue au cours du temps quand on applique une contrainte constante. Après suppression de cette contrainte, on ne retrouve la viscosité initiale qu'après un certain temps plus ou moins long. C'est un phénomène réversible (figure 2.2) [39]. Le comportement thixotrope concerne les corps fluidifiants et les corps plastiques [37,38].

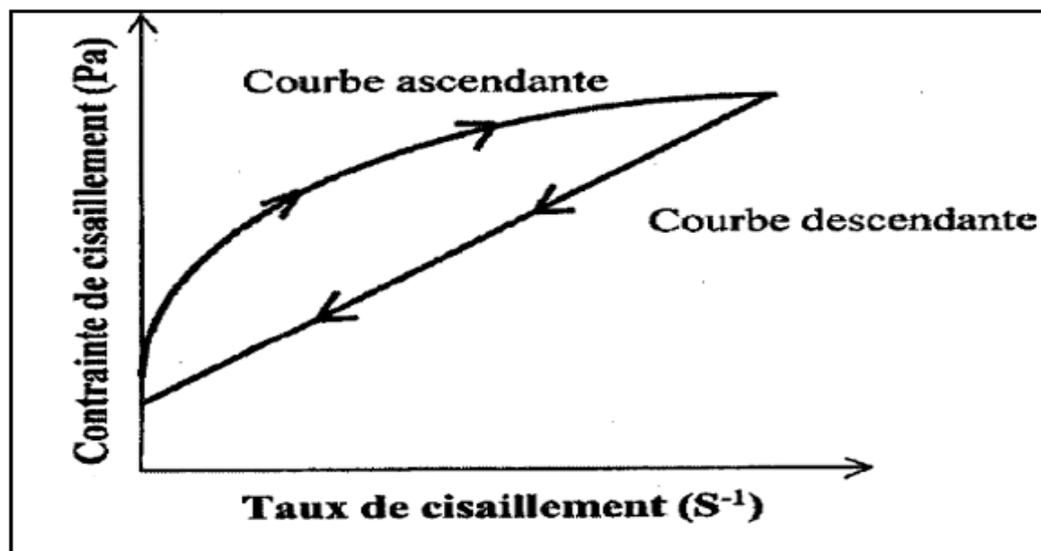


Figure 2.2: Comportement d'un corps thixotrope [33,39].

### 2.5.2. Paramètres rhéologiques

#### 2.5.2.1. Viscosité

Par définition la viscosité est une mesure des frictions internes d'un fluide lors du déplacement d'une couche moléculaire par rapport à celle qui lui est sous-jacente. En raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, cette friction apparaît

lorsqu'une tranche de fluide se déplace par rapport à une autre tranche. Elle se traduit par la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle (figure 2.3).

La viscosité est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et le gradient de vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad 2.4$$

Avec:

$\tau$  : contrainte de cisaillement

$\dot{\gamma}$  : taux de cisaillement

$\mu$  : viscosité plastique

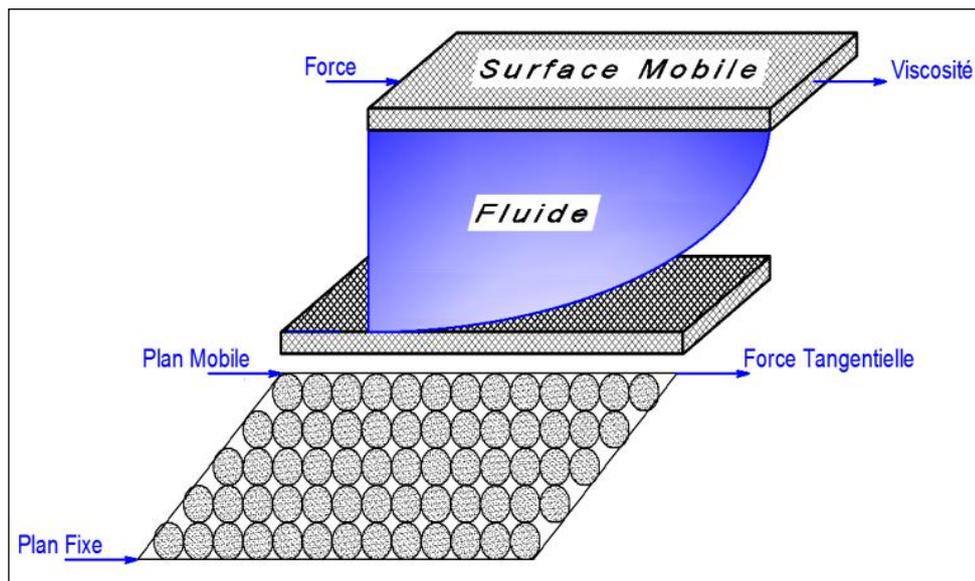


Figure 2.3: Schéma du glissement des couches [32].

#### 2.5.2.2. Contrainte de cisaillement

Une contrainte de cisaillement  $\tau$  est une contrainte mécanique appliquée parallèlement ou tangentiellement à une face d'un matériau contrairement aux contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire [32,36]. Ainsi, la contrainte de cisaillement c'est le rapport d'une force par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad 2.5$$

Avec :

$\tau$  : Contrainte de cisaillement [Pa],

$dS$  : surface élémentaire d'une couche cisailée,

$dF$  : projection de la force de frottement tangentielle.

### 2.5.2.3. Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement ou « gradient de vitesse » ou « taux de cisaillement », mesure le cisaillement appliqué au sein d'un fluide. Elle dépend de la contrainte de cisaillement et de la nature du fluide. Le gradient de vitesse s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives d'un fluide cisailé.

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole  $\gamma$  suivant la relation :

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad 2.6$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement. Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [35].

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad 2.7$$

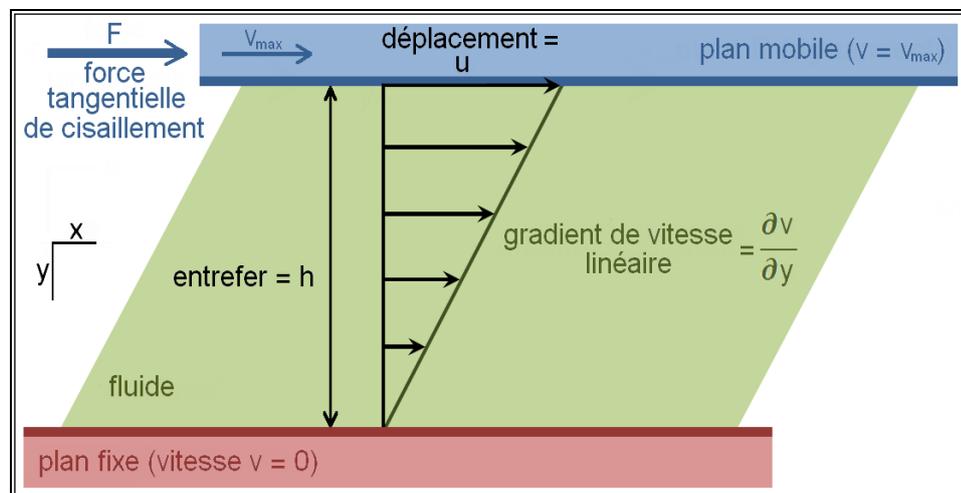


Figure 2.4: Schéma de la vitesse de cisaillement [32].

#### 2.5.2.4. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas.

Il existe différentes méthodes pour mesurer le seuil de cisaillement parmi lesquelles des méthodes qui nécessitent la connaissance des notions physique du matériau [32]. Le tableau 2.2 résume les plages des caractéristiques rhéologiques des matériaux cimentaires [40].

Tableau 2.2 : Paramètres rhéologiques des pates ciments, mortier et béton [40]

| Matériaux                                 | Pate de ciment, coulis | Mortier | Béton fluide | Béton autoplaçant | Béton ordinaire |
|---|------------------------|---------|--------------|-------------------|-----------------|
| Seuil de cisaillement (N/m <sup>2</sup> ) | 10-100                 | 80-400  | 400          | 50-200            | 500-2000        |
| Viscosité (Ns/m <sup>2</sup> )            | 0.01-1                 | 1-3     | 20           | 20-100            | 50-100          |

#### 2.5.3. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique. La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées. Le comportement rhéologique d'un matériau (figure 2.5) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement,  $\tau_0$ . Le fluide est considéré comme Binghamien si la courbe d'écoulement est une droite [41].

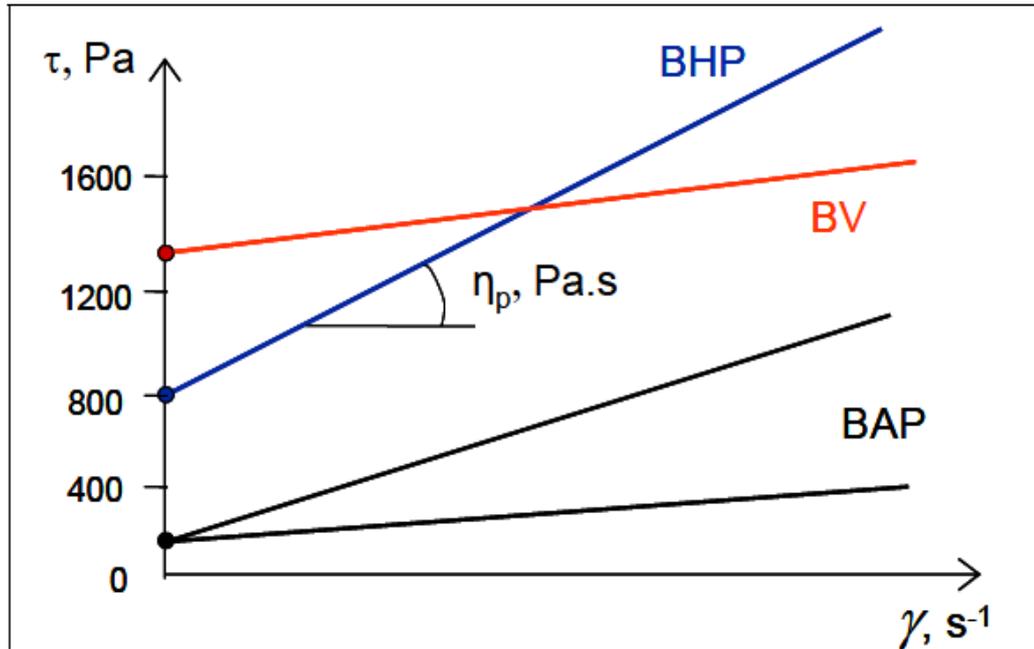


Figure 2.5: Comportements rhéologiques pour différents types de béton [41].

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [39] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a \gamma^b \quad 2.8$$

Où :

a et b sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres. A ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont :

- Le rhéomètre coaxial BTRhéom (employé en France [39]),
- Le viscosimètre à plaque parallèle BML (utilisé en Islande [42]),
- Le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG (utilisé en France [32,33,43])

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons de résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes [41].

## 2.6. Effet des additions minérales sur les performances des BAP

L'utilisation des ajouts cimentaires s'avère une méthode éprouvée pour lutter contre les changements climatiques et améliorer certaines caractéristiques du béton. Ces ajouts minéraux sont essentiellement des résidus d'autres industries ou des produits naturels de faible valeur commerciale. Parmi ces ajouts on trouve : les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle...etc. L'utilisation des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts. En effet, le clinker étant obtenu par transformation de la crue (argile + calcaire) nécessite une dépense d'énergie très importante pouvant être réduite par l'introduction de ces ajouts.

Une addition minérale peut être ajoutée et/ou substituée au ciment lors de sa fabrication (ciment composé) ou ajoutée directement dans le malaxeur lors de la fabrication du béton. Elle permet ainsi d'améliorer certaines propriétés ou conférer aux matériaux des propriétés particulières. On distingue deux types d'additions: les additions inertes et les additions réactives [44]. L'introduction des ajouts minéraux tel que les cendres volantes et le laitier dans la confection du béton présente un effet bénéfique sur les propriétés à l'état frais. L'écoulement du béton à l'état frais dépend de la composition du ciment, la concentration du  $C_3A$ , le rapport  $C_2S/C_3A$ , la finesse du ciment et le type de superplastifiant utilisé [45].

### 2.6.1. Effet des additions minérales sur les performances des BAP à l'état frais

L'introduction du laitier dans un béton améliore son ouvrabilité, en raison de sa plus faible réactivité que le ciment et aussi de sa faible densité. L'utilisation du laitier baisse la demande de l'adjuvant, un ciment contenant 65% du laitier demandait 1.0% de superplastifiant, tandis que celui sans laitier en demandait 1.3% de superplastifiant. La substitution partielle du

ciment par le laitier dans un béton retarde le temps de prise. Ce retard dépend du dosage du mélange et de la température ambiante. Si la température est plus faible que 20°C, les retards peuvent être plus marqués surtout dans les bétons ayant plus de 50% de laitier. Si la température est plus élevée que 30°C, le temps de prise est proche de celui du béton sans laitier [46]. En général, les BAP présentent une faible valeur de seuil de cisaillement et une viscosité adéquate. En plus l'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la déformabilité, la capacité de remplissage dans un milieu confiné. Le flux d'entonnoir en V-funnel est utilisé pour évaluer la capacité d'écoulement sans blocage. Par conséquent, l'introduction des additions minérales telles que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, de calcaire améliorent la fluidité et la cohésion et limite la chaleur d'hydratation et permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des pâtes de ciment [47]. L'étude réalisée par Ramanathan et al. [48] montre que la teneur des additions minérales peut réduire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir une fluidité donnée. La viscosité varie sensiblement avec chaque addition minérale et dépend de ses propriétés et de son interaction avec le superplastifiant et les grains du ciment. La viscosité des mortiers augmente avec la présence de la pouzzolane naturelle. Par contre le laitier et le calcaire entraînent une légère diminution même sans superplastifiant. De plus, l'effet du laitier est le plus important lorsque son taux de substitution atteint 20% [33].

Selon Her-Yung et Chih-Chung [49] l'addition du laitier comme substituant de ciment améliore les propriétés à l'état frais. Les résultats montrent que les pertes d'ouvrabilité après 90 min pour les substitutions en laitier de haut fourneau de 0%, 15% et 30%, sont 10 mm, 10 mm et 20 mm, respectivement. La perte maximale est d'environ 20 mm qui a été observée lorsque la substitution du laitier est de 30%. L'étalement varie en fonction du taux de substitution du ciment Portland par le laitier de haut fourneau. Le dosage optimal est de 15% de laitier. Les propriétés des BAP à base du laitier diffèrent en raison de la composition différente des proportions. D'après Vejmelkova et al. [50], les propriétés rhéologiques de laitier de haut fourneau ne représentent aucune contrainte d'écoulement car le laitier augmente le diamètre d'étalement et sert à diminuer le temps d'écoulement  $T_{vf}$ .

Boukendakdji et al. [51] ont montré que l'utilisation des matériaux locaux et laitier peuvent produire un bon béton autoplaçant. La substitution du ciment par le laitier améliore les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais. Une amélioration de l'ouvrabilité a été

observée jusqu'à 20% de laitier avec un optimum de 15%. La contrainte de cisaillement et la viscosité plastique ont montré des valeurs décroissantes.

Le laitier granulé favorise l'écoulement des pâtes de ciment, principalement à cause de sa demande en eau qui est moins importante que celle du ciment et aussi à cause de sa morphologie [52,53]. Ahari et al. [54] ont montré que l'effet binaire de la fumée de silice et le laitier granulé conduit à la viscosité plastique et du temps V-funnel par rapport le BAP de référence. Le laitier contient de la chaux (45 à 50 %), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine (15 à 20 %) et 10% environ de magnésie d'oxydes divers et de manganèse. Son utilisation permet de diminuer la quantité de chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment et d'augmenter les hydrates dans la pâte. La substitution du ciment par le laitier de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment [55].

Par contre Shi et al. [56] ont montré que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le super plastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou une même valeur de seuil de cisaillement. Uysal et al. [57] ont montré que parmi les additions minérales, les meilleures performances de maniabilité ont été obtenues pour la série des bétons à base de fumée de silice. En général, l'utilisation des additions minérales améliore significativement les propriétés à l'état frais et vise à accroître la distribution des particules de la matrice de la poudre, et par conséquent, de réduire les frottements entre particules. En générale l'augmentation de zéolite naturelle dans la formulation des BAP conduit à une augmentation de la viscosité qui est expliqué par le T50 et le temps d'écoulement en V-funnel. Ainsi une bonne corrélation a été observée entre le T50 et le temps d'écoulement en V-funnel avec un coefficient égal à 0.96. L'introduction de la zéolite naturelle diminue l'étalement des BAP [58].

Gesoglu et al. [59], ont observé que l'utilisation de ciment ternaire (ciment portland, fumée de silice et laitier) satisfait les recommandations d'EFNARC [60] en termes de temps d'écoulement de V-funnel. L'augmentation des quantités de poudre de marbre et filler calcaire ont augmenté la viscosité. Par contre on a observé que l'addition de fumée de silice dans les systèmes ternaires a entraîné une diminution des viscosités des mélanges par rapport aux mélanges binaires. L'addition de ces minéraux dans les BAP augmente le temps de prise des mélanges par rapport au béton de référence [61]. La teneur en air dans les bétons autoplaçants à haute performances à l'état frais dépend de ses propriétés rhéologiques. Il

existe une corrélation entre les paramètres rhéologiques d'un béton frais et de l'air entraîné dans celui-ci. La diminution de taux de cisaillement provoque une diminution de l'air dans le béton frais [62]. L'introduction des fibres polypropylène entraîne une amélioration des propriétés à l'état frais des BAP en réduisant la ségrégation [63].

Selon Dinakar et al. [64], le temps d'écoulement V-funnel présente également un comportement proportionnel à la teneur de la cendre volante. Le dosage des cendres volantes jusqu'à 50% de substitution diminue le temps  $T_{vf}$ . De nombreux chercheurs ont utilisé à la fois le T50 et V-funnel comme indicateurs de la viscosité des bétons très fluides. Tous les mélanges ont des propriétés satisfaisantes à l'état frais. Le diamètre d'étalement varie entre 690 mm et 725 mm, et tous les mélanges sont appartenent à cette catégorie [39].

### 2.6.2. Effet des additions minérales sur les propriétés mécaniques des BAP

L'utilisation des additions minérales conduit à une modification de la cinétique d'hydratation des BAP, ce qui peut influencer sur leurs comportements mécaniques. Saric-Coric [46] a montré que les résistances des bétons au laitier restent toujours inférieures aux bétons témoins et plus la teneur du laitier est élevée plus la résistance est faible.

Menendez et al. [66] ont étudié le développement de la résistance des liants ternaires contenant des fillers calcaires et du laitier. Ils ont trouvé que la combinaison des fillers calcaire et du laitier de haut fourneau est complémentaire. Les fillers calcaires améliorent la résistance du ciment au jeune âge tandis que le laitier de haut fourneau améliore la résistance à long terme par la réaction pouzzolanique qui raffine les systèmes de pore. Ils ont montré que le mélange de ciment ternaire offre un avantage par rapport aux ciments binaires et aux ciments Portland sans ajouts. Ces auteurs ont trouvé une combinaison optimale renfermant 70% de ciment Portland, 20% de laitier et 10% de filler calcaire. L'utilisation de la fumée de silice augmente la résistance à la compression des BAP. Plus le taux de substitution est grand, plus la résistance à la compression est grande [67]. La fissuration précoce due au retrait de séchage affecte la durabilité à long terme du béton. De même, la résistance à la compression du béton à tout âge est influencée par les agents externe et dépend des pores intrinsèques et de leur connectivité. Les pores interconnectés conduisent au transport d'agents externes tels que l'humidité et les chlorures [68].

### 2.6.3. Effet des additions minérales sur la durabilité des BAP

La durabilité d'un ouvrage est un des points clés d'un développement durable. Elle est définie comme la résistance du béton au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. En maintenant son comportement et ses performances dans des bonnes conditions de service prévus pour l'ouvrage.

La durabilité des structures en béton est influencée non seulement par les chargements mécaniques mais elle est directement liée à l'environnement (climat chaud, marin, pluie, gel dégel ...ect). Ces influences deviennent plus importantes quand on doit garantir une durée de service pendant une grande période [55].

Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage. En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant la durée de service requise [69].

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts d'agents agressifs à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Les caractéristiques du réseau poreux déterminent les propriétés de transfert et elles sont donc des indicateurs de premier ordre dans la prédiction de la durabilité des structures en béton. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les trois principaux mécanismes de transfert des fluides à l'intérieur du béton sont la perméation, la diffusion et l'absorption. La perméation concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression. La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires. Donc la durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant [55]. En général, 20 à 50 % du volume de la pâte est constitué par des pores. Le volume et la forme des vides influent sur la qualité des matériaux durcis. On distingue:

- Les macropores (pores capillaires), constituées par des vides entre les hydrates et les anhydres (la taille  $D > 10^{-2} \mu\text{m}$ ).
- Les micropores (pores du gel), constituées par des vides dans les gels hydratés (la taille  $D < 10^{-2} \mu\text{m}$ ).

Les pores capillaires occupent la plupart du volume de vide dans le matériau, ils conditionnent les mécanismes de transfert. Leur volume diminue progressivement au cours de l'hydratation et dépend en grande partie du rapport eau/ciment (E/C).

Le mécanisme de dégradation chimique du béton consiste à une déclassification progressive du béton au cours du temps en contact avec un environnement agressif. La dégradation du béton provoque une augmentation de la porosité du béton qui modifie ces propriétés physico-chimiques et mécaniques. D'une part cette augmentation de la porosité accélère le processus de transport (perméabilité ou diffusion) de matières et entraîne une accélération de la dissolution des hydrates (notamment la portlandite). D'autre part, ceci induit une modification des propriétés mécaniques comme la perte de résistance et la perte de rigidité. En plus, les sollicitations mécaniques créent des microfissures qui peuvent être des facteurs accélèrent le processus de dégradation chimique [55].

#### 2.6.3.1. Absorption capillaire

Turk et al. [70] ont montré qu'une bonne cure et un mélange pouzzolanique (fumée de silice ou cendre volante) comme substituant du ciment améliorent l'absorption d'eau capillaire de manière significative. Selon Zhu et al. [71], les BAP présentent un coefficient d'absorption plus faible en comparant avec les bétons vibrés. D'autres chercheurs [68] montrent que la substitution du ciment des BAP par 10% de déchet de granite diminue l'absorption d'eau et la porosité à long terme.

Da Silva et De Brito [72] montrent que pour tous les BAP étudiés l'absorption capillaire diminue avec l'augmentation de la période de cure. Les résultats obtenus indiquent que la porosité augmente généralement progressivement avec l'augmentation du taux de substitution de cendre volante et filler de calcaire.

### 2.6.3.2. Perméabilité aux ions du chlorure

Les BAP présentent des coefficients de diffusion et de perméabilité plus faibles que le béton ordinaire vibré. Le type d'addition minérale utilisée dans les formulations de BAP influe considérablement sur la diffusion et sur la perméabilité de ces bétons [55].

La perméabilité aux ions chlore des bétons contenant 20% du laitier et 5% de fumée de silice est très faible si on la compare à celle des bétons sans ajouts minéraux [46].

La perméabilité aux ions chlorure des BAP contenant de laitier (GBFS), la fumée de silice (FA), filler de calcaire(LP), la poudre de basalte(BP), la poudre de marbre(MP) diminuent lorsque le taux de substitution des ajouts minéraux est augmenté (Figure2.6). Les résultats montrent que le mélange contenant 60% de laitier présente la perméabilité aux ions chlore la plus faible [57].

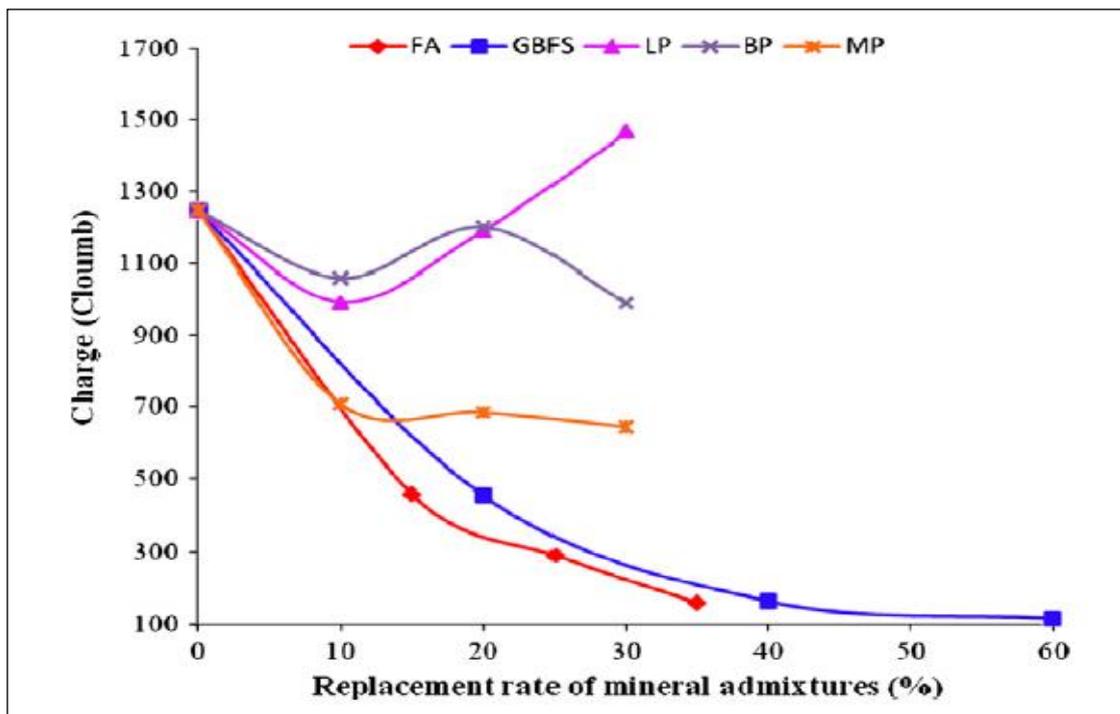


Figure 2.6: La perméabilité aux ions chlore des BAP à base des ajouts minéraux [57].

### 2.6.3.3. Porosité

Chaïd et al. [73] ont rapporté qu'une mouture poussée du laitier favorise l'accroissement de la compacité des bétons. Ceci explique l'augmentation de leurs résistances par rapport au béton sans ajout. L'observation au microscope électronique à balayage a permis d'examiner

la microstructure des hydrates formés au sein des bétons au bout de 365 jours de durcissement. Une microstructure relativement améliorée des bétons avec le laitier et des interfaces relativement plus densifiées et riches en CSH. L'incorporation du laitier finement broyé engendre également un effet granulaire relatif aux modifications induites sur la compacité du squelette granulaire. Sur le plan physicochimique, le laitier entraîne la formation d'une peau de béton relativement plus imperméable et par conséquent un béton plus durable.

#### 2.6.3.4. Perméabilité à l'eau

Ramezaniipoor et al. [74] ont montré que l'effet des additions minérales sur la pénétration de l'eau à l'âge de 28 et 90 jours ont réduit la profondeur de la pénétration de l'eau. Cette observation suggère que la taille des pores a été considérablement réduite et les la connexion des pores capillaires a été largement éliminée. Les essais de durabilité ont montré que les additions minérales provoquent une amélioration de la durabilité due à une formation plus rapide de gel C-S-H et de la chaux CH qui cessent de remplir les pores intérieurs.

#### 2.7. Effet du climat chaud sur les performances des BAP à l'état frais

Ghafouri et Diawara [75] ont montré que la performance du béton autoplaçant à l'état frais est affectée par les températures chaudes et froides. À des températures élevées, l'influence s'est manifestée sous la forme d'importante diminution de l'ouvrabilité en milieu ouvert, augmentation importante de la viscosité plastique, et l'amélioration de la stabilité dynamique des BAP frais. La température froide a affecté la performance des BAP frais par un gain marginal de la capacité d'écoulement, petite variation de la vitesse d'écoulement et une augmentation de la résistance à la ségrégation. Le changement des propriétés du béton frais est dû à l'élévation ou la diminution de la température qui peut être caractérisée par la quantité d'adsorption de mélange par la surface spécifique de la pâte du béton ( $Ads/SSAP$ ), l'évolution de la teneur en humidité de l'agrégat et l'évaporation partielle de l'eau du mélange dans le cas d'élévation de la température [75]. L'influence de la température sur l'étalement est donnée par la figure 2.7.

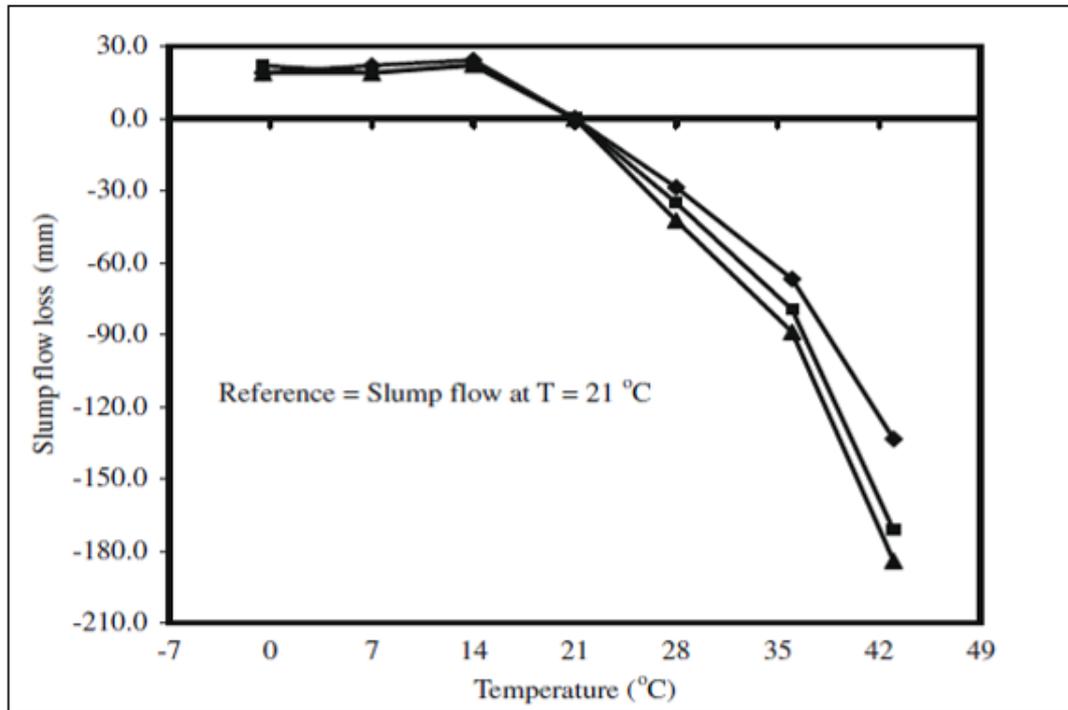


Figure 2.7: Influence des températures sur étalement des BAP [75].

Les travaux de Griesser [76] illustrés sur les figures 2.8 et 2.9 montrent que les ciments riches en  $C_3A$  se manifestent par un plus fort seuil d'écoulement. En général, le seuil de cisaillement augmente avec la température. Cette dépendance est plus prononcée en cas du ciment C riche en  $C_3A$  (12.6%) où sa valeur double lorsque la température passe de 20 à 30°C. Le coefficient de viscosité relative a tendance à diminuer avec l'élévation de température et semble relier au type de superplastifiant utilisé. La viscosité augmente au cours du temps et d'autant plus si la température ambiante est élevée surtout entre 20 et 30°C.

L'influence de la température sur les propriétés rhéologiques de mortiers ou bétons est un problème important. Golaszewki et Szwabowski [77] ont observé que les propriétés rhéologiques des mortiers contenant du superplastifiant sont fortement influencées par la température accompagnée d'une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de la viscosité plastique. Avec l'élévation de la température la contrainte de cisaillement diminue, cette diminution est beaucoup plus marquée en présence d'un superplastifiant.

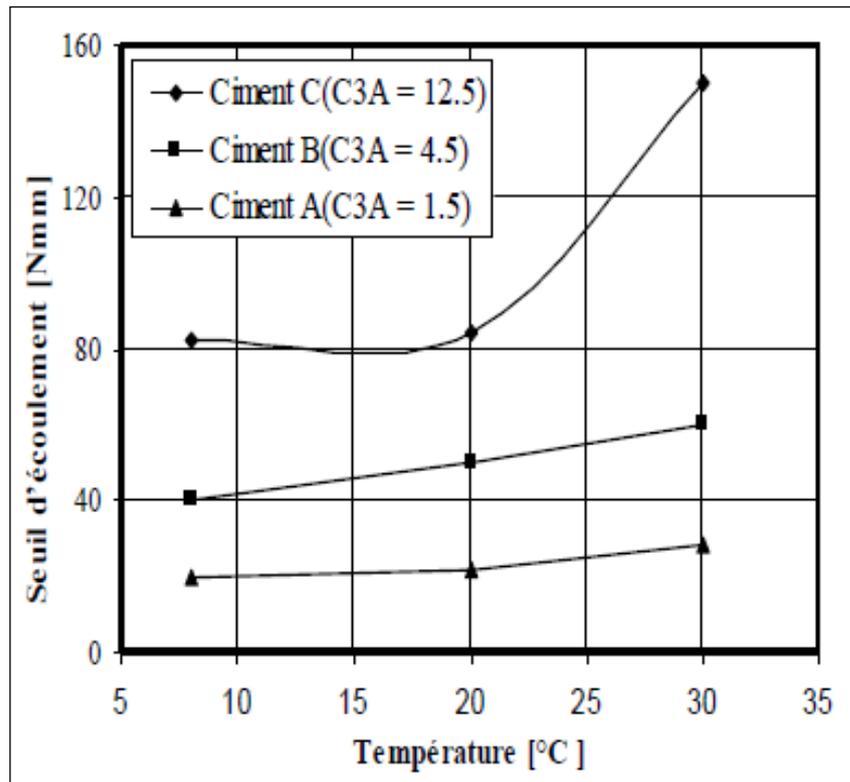


Figure 2.8: Variation du seuil d'écoulement en fonction de la température pour différentes pates de ciment [76].

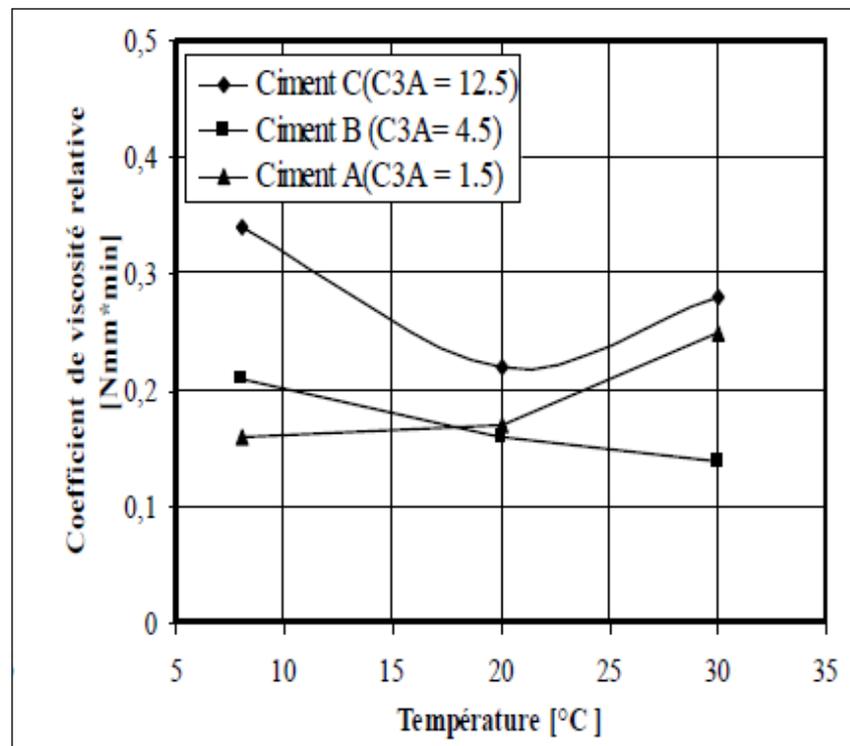


Figure 2.9: Coefficient de viscosité relative en fonction de la température et le dosage en superplastifiant [76].

## 2.8. Effet du climat chaud sur la résistance à la compression des BAP

L'hydratation du laitier est plus lente par rapport à celle du ciment. Pour assurer un gain de résistance et une bonne durabilité, il est nécessaire de prolonger la cure des bétons préparés avec du laitier. La durée de cure devrait dépendre de la température ambiante, du type de laitier et du ciment et le taux de substitution [46]. La cure initiale pourra augmenter la résistance à la compression considérablement. La température élevée entraîne une résistance initiale à la compression élevée qui est due à l'hydratation du C-S-H et l'accélération de la formation du gel C-S-H [74,78].

An Le [79] a montré que le BAP1 et BAP2, incorporant le ciment CEM I, diffèrent essentiellement par la quantité de filler calcaire afin d'appréhender l'effet d'une diminution de clinker et d'une augmentation de la quantité de filler sur le comportement du béton avec l'élévation de la température. La composition BAP3 est, quant à elle, basée sur l'utilisation d'un liant ternaire clinker/laitier/filler calcaire. Elle s'apparente à la composition BAP2 en ce sens qu'elle présente un dosage en CEM III qui est très proche de la quantité en liant équivalent de BAP2 ( $C+kA = 350+0,25*87,5 = 372\text{kg/m}^3$ ). L'élévation de la température initiale du béton de 20°C à 50°C favorise les résistances mécaniques à la compression à toutes les échéances étudiées 1j, 7j et 28jours, pour BAP1 et BAP2, quel que soient les moyens de maintenir l'autoplaçance. Concernant BAP3, cette élévation de la température initiale n'induit pas de variation de résistance à toutes les échéances. L'élévation de la température de mûrissement durant les premières 24 heures (35°C durant les cinq premières heures après le malaxage) tend classiquement à augmenter les résistances à court terme (1j).

D'autre part, Dumne [80] a rapporté que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant dans les bétons contenant 10% de cendres volantes avec un rapport E/C constant de 0.55 en variant le dosage en superplastifiant de 0.25, 0.30 et 0.35 respectivement (Figure 2.10). De même, on peut dire qu'un gain rapide de la résistance à la compression est observé à 7 jours de durcissement. Plus tard, le taux de gain de résistance à la compression se stabilise avec l'augmentation de la durée de durcissement des différents mélanges.

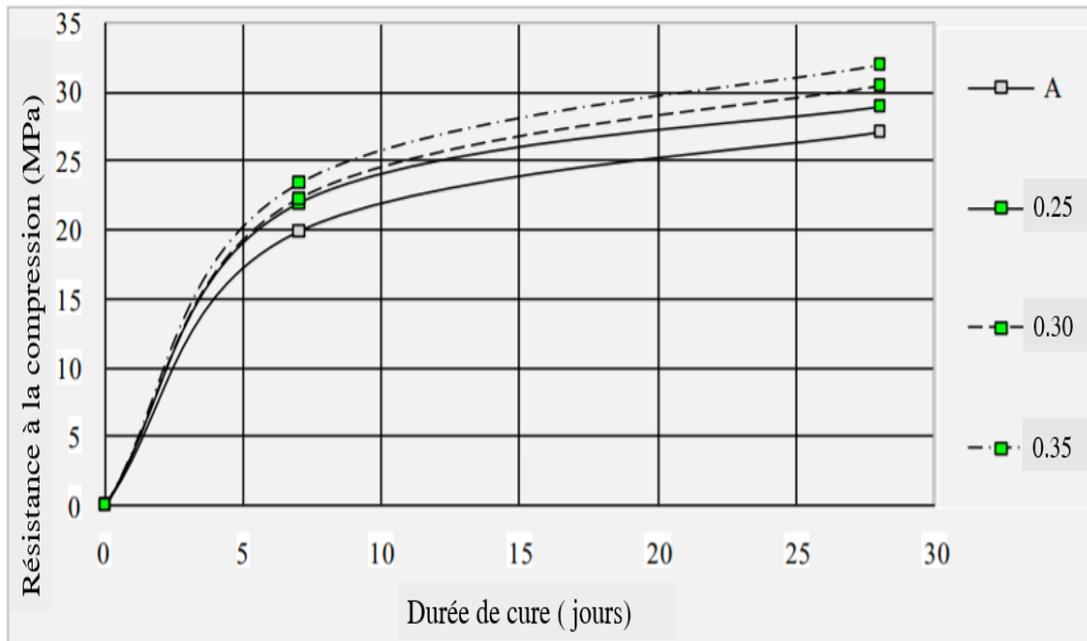


Figure 2.10: Variation de la résistance à la compression [80].

Weisheit et al. [81] montrent que, lorsque les éprouvettes de BAP incorporant un ciment au laitier sont conservées à une température de mûrissement élevée aux très jeunes âges (30°C durant 16 heures puis conservation dans l'eau à 20°C), les résistances sont plus élevées à court terme et équivalentes, dès 7 jours, à la référence mûrie à 20°C (figure 2.11). L'emploi d'un ciment au laitier peut donc être d'intérêt pour contrecarrer les effets préjudiciables d'une température de cure élevée.

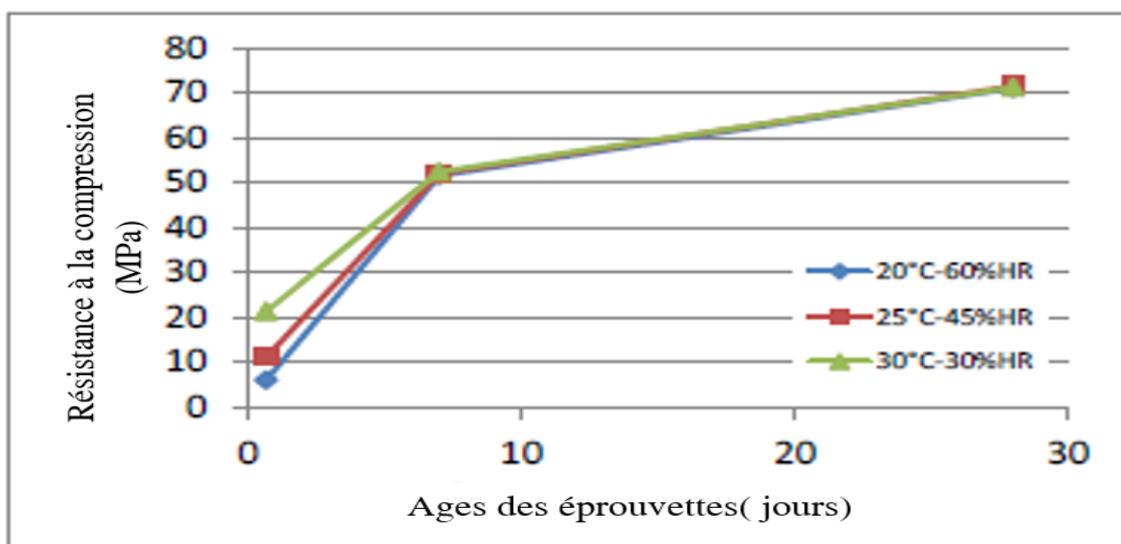


Figure 2.11: Evolution des résistances à 16h, 7j et 28 j avec l'élévation de la température de cure d'un BAP incorporant un ciment III/A [81].

Heba [82] a analysé l'effet de cure dans l'eau (7 et 28 jours) et à l'air sur la résistance à la compression du béton autoplaçant dosé à 450 et 550 kg/m<sup>3</sup> pour les mélanges à base de cendres volantes, laitier, et soit un ciment type I soit un ciment type II (Figures 2.12 à 2.15). Elle a observé que le BAP avec 10% de cendres volantes et 10% de fumée de silice présente la plus grande résistance du béton à la compression. La résistance à la compression la plus élevée est obtenue à partir des éprouvettes durcis dans l'eau pendant 28 jours et la valeur la plus faible est obtenue pour les échantillons qui ont été conservé à l'air libre. Les BAP avec 15% de fumée de silice donne des valeurs plus élevées de résistance à la compression que ceux contenant 30% de cendre volantes.

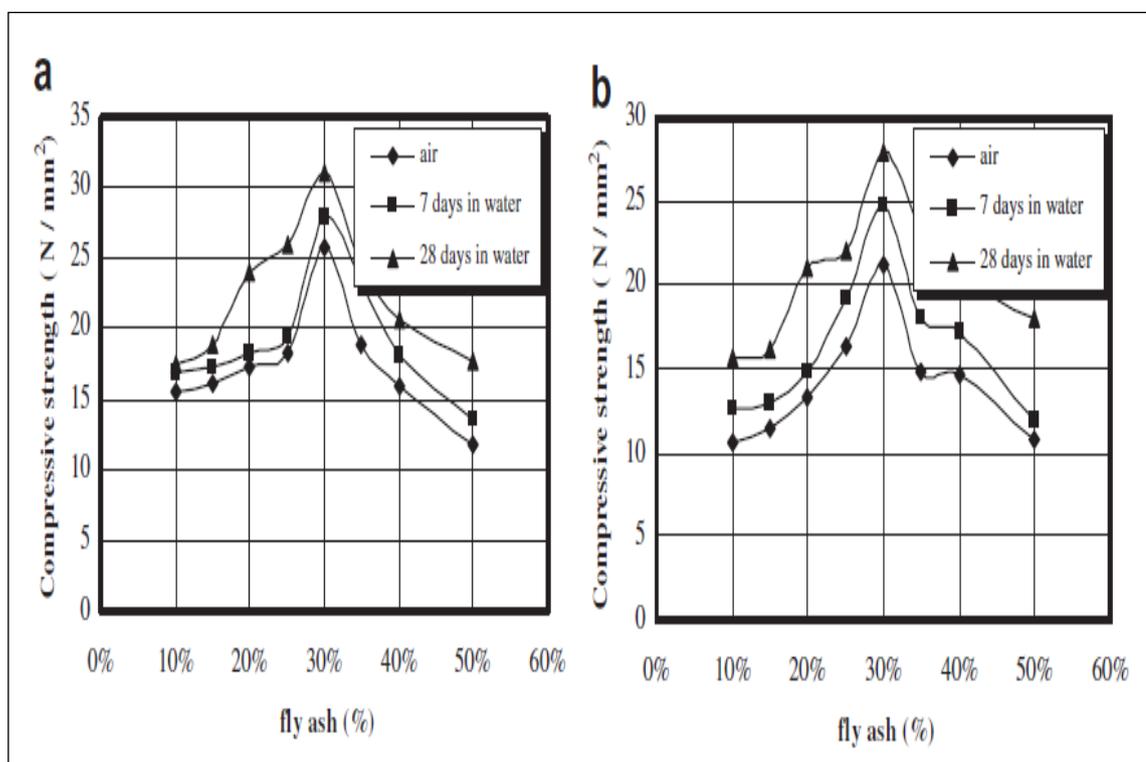


Figure 2.12 : Résistance à la compression de type I: (a) dosage en ciment = 550 kg/m<sup>3</sup>; (b) dosage en ciment = 450 kg/m<sup>3</sup> [82].

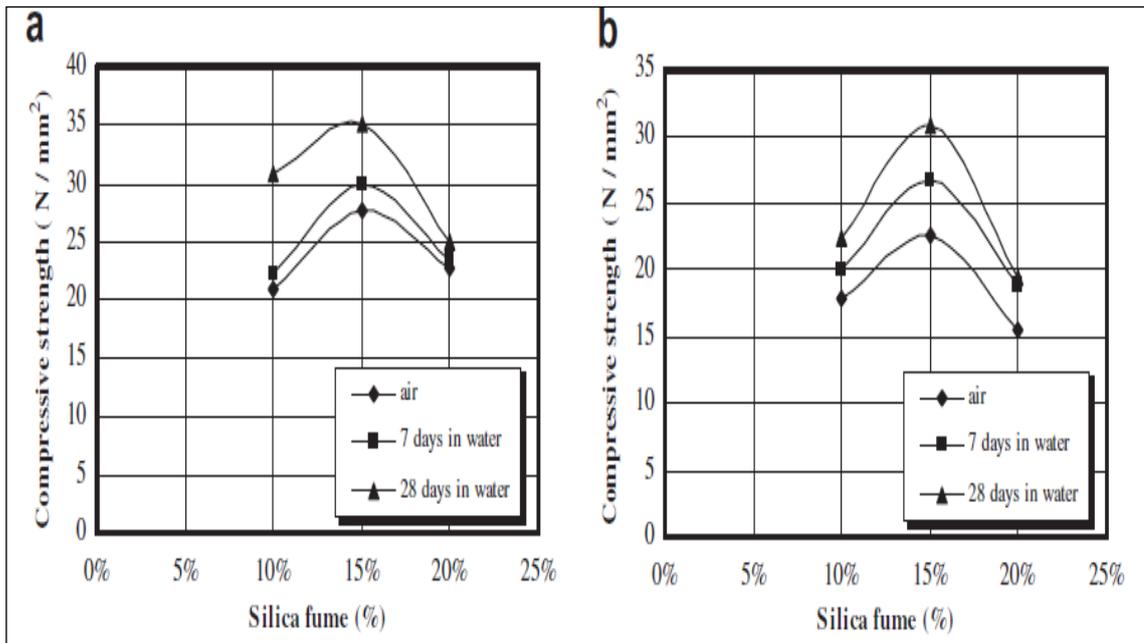


Figure 2.13: Résistance à la compression de type II: (a) le dosage en ciment = 550 kg/m<sup>3</sup>; (b) dosage en ciment = 450 kg/m<sup>3</sup> [82].

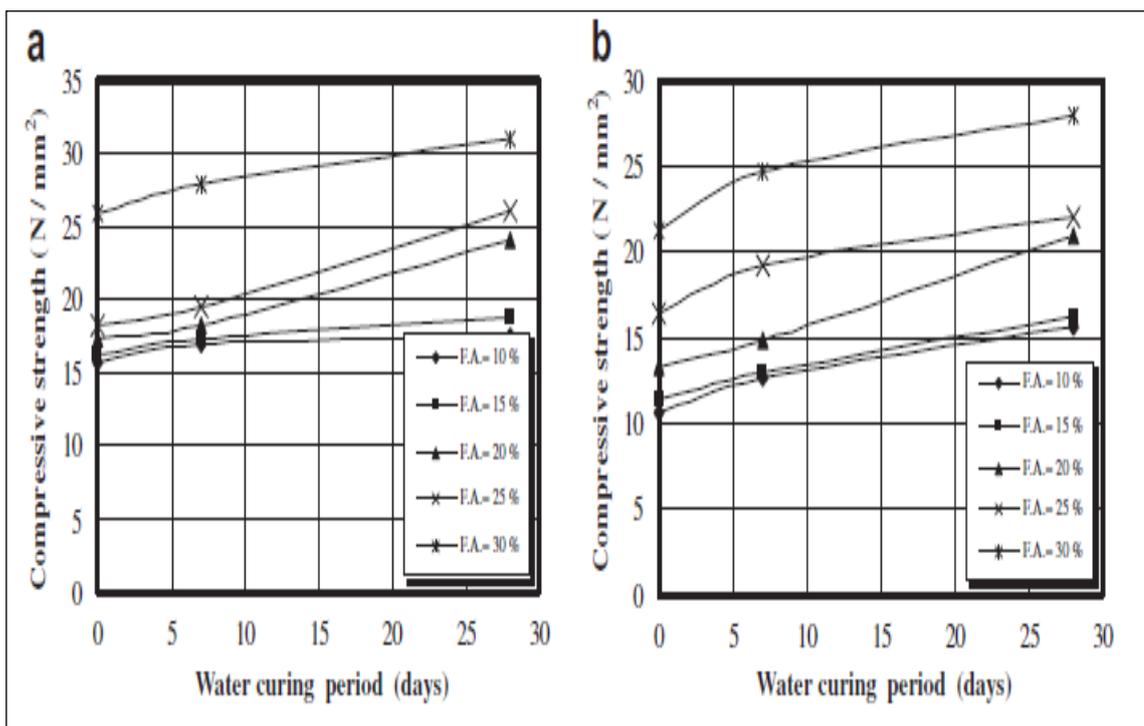


Figure 2.14: Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type I : (a) le dosage en ciment = 550 kg/m<sup>3</sup>; (b) dosage en ciment = 450 kg/m<sup>3</sup> [82].

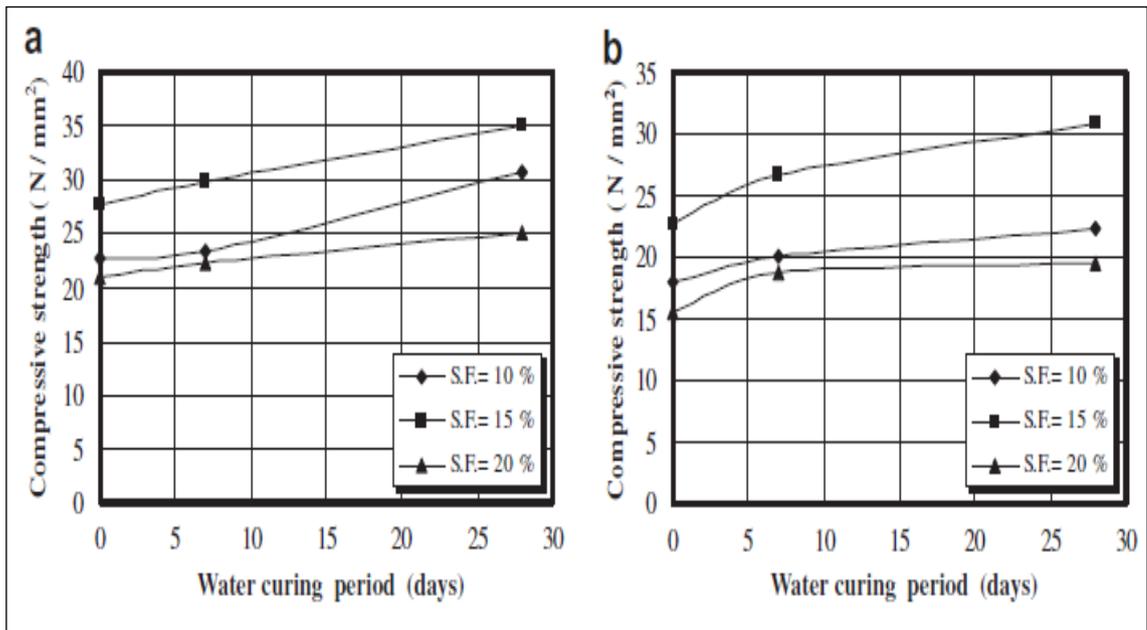


Figure 2.15: Effet de condition de cure sur la résistance à la compression pour le type II :  
 (a) le dosage en ciment = 550 kg/m<sup>3</sup>; (b) dosage en ciment = 450 kg/m<sup>3</sup> [82].

Turkmen et Kantarci [83] ont montré que la résistance à la compression de tous les bétons conservés dans l'eau à base de perlite expansée de 0, 5, 10 et 15% respectivement est plus grande que celles des béton conservés dans les autres conditions (saturation dans la chaux, dans l'air, mouillé trois fois par jour pendant 14 jours et ensuite conservé dans l'air, 14 jours dans une cure humide après conservé dans l'air ou 100% d'humidité relative constante) (Figure 2.16).

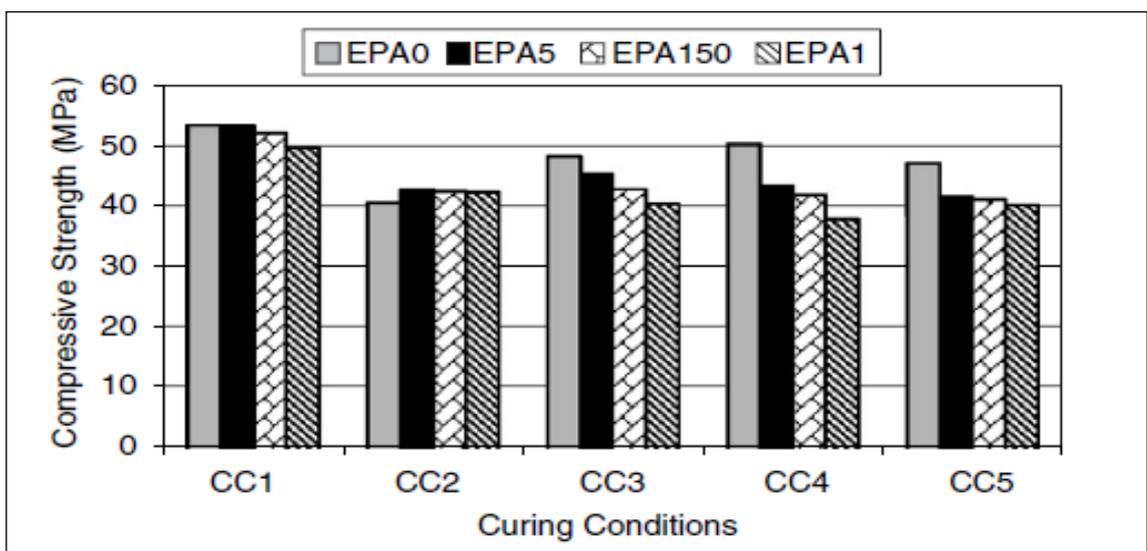


Figure 2.16: Résistance à la compression des éprouvettes de béton selon le pourcentage d'EPA et les conditions de cure [83].

D'après Zhao et al. [84], le développement des résistances à la compression des BAP après une période initiale de cure varie de 33,8 MPa à 36,4 MPa ; 50,2 MPa à 52,6 MPa et de 57,9 MPa à 63,3 MPa pour une période de cure de 3, 7 et 28 jours respectivement (Figure 2.17). Les BAP avec une durée de cure de 7 jours et dans des conditions de cure ( $T=28^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=85\%$ ) a un taux de gain de résistance à la compression très élevé.

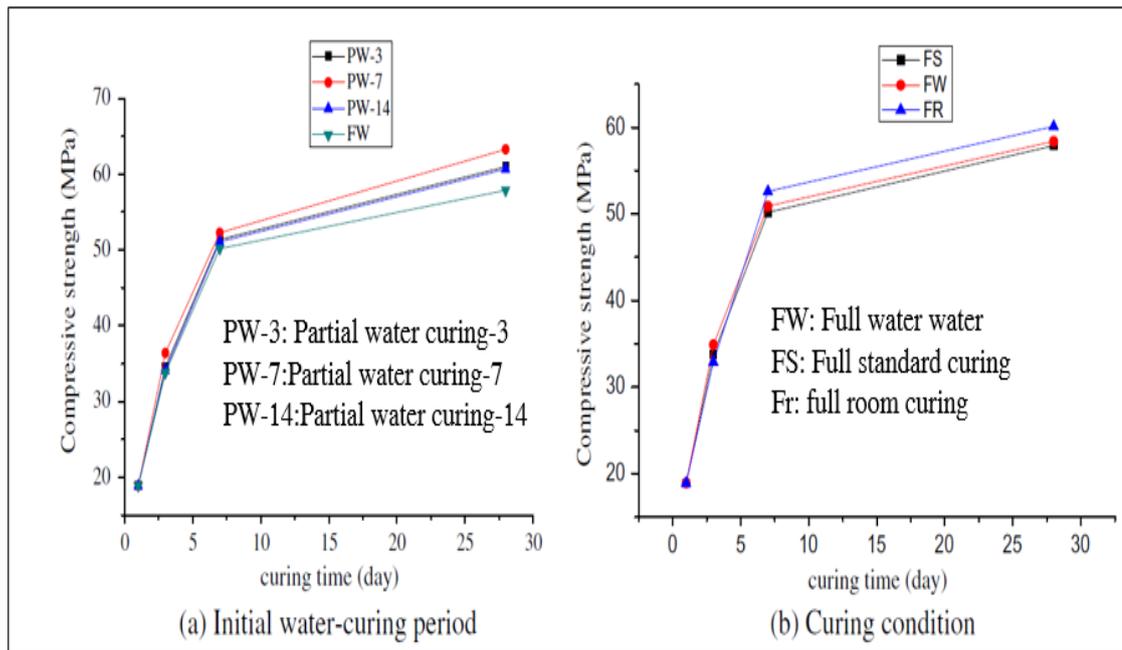


Figure 2.17: Développement de la résistance à la compression des BAP selon la durée de cure initiale dans l'eau et selon des différentes conditions de cure [84].

Selon Turk et al. [70], les résistances à la compression et à la traction des bétons autoplaçants avec ( $E/C=0,38$ ) étaient plus élevés que ceux du béton ordinaire avec ( $E/C=0,58$ ) pour tous les âges et pour toutes les conditions de cure (Figure 2.18).

Les BAP contenant de la fumée de silice comme substituant au ciment ont donné des valeurs plus élevées de résistance à la compression par rapport aux bétons contenant les cendres volantes. Pour tous les bétons, les échantillons conservés dans l'eau ont les plus grandes valeurs de résistance à la compression suivies par les échantillons qui sont durcis sous d'autres conditions.

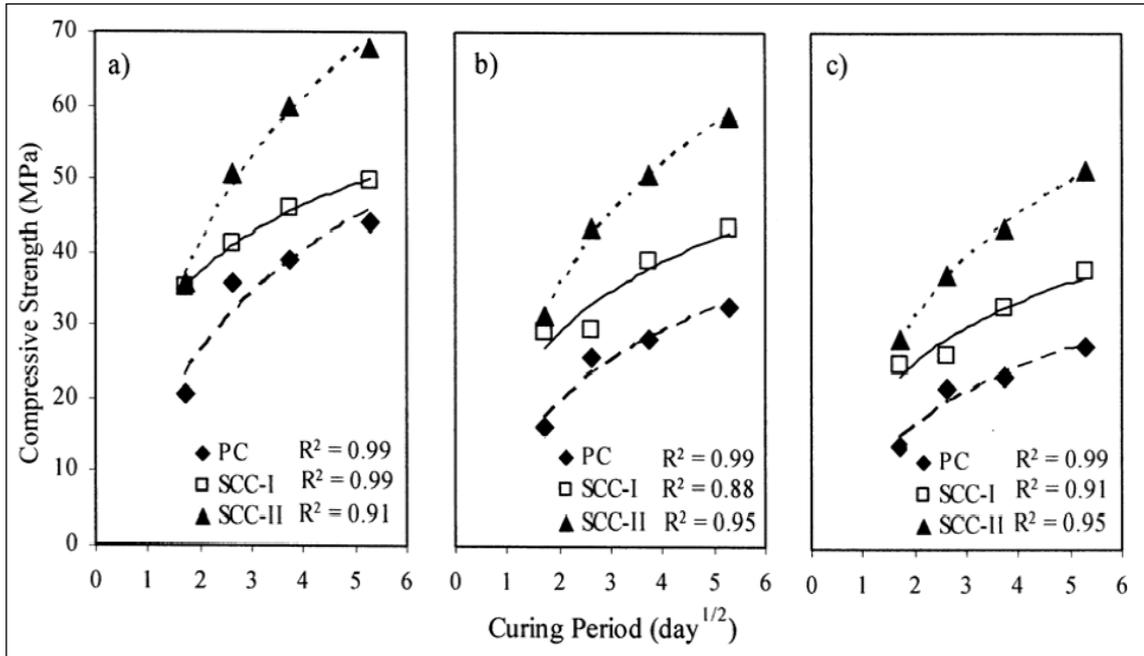


Figure 2.18: Résistance à la compression du béton ordinaire et BAP pour les différentes méthodes de cure (a) eau, (b) couvert et (c) air [70].

Bingöl et Tohumcu [85] montrent que les valeurs les plus élevées de la résistance à la compression ont été mesurées sur les spécimens après 28 jours de cure pour tous les groupes. L'augmentation de la durée de cure conduit à une augmentation de la résistance à la compression. Le durcissement à l'air réduit la résistance à la compression et les valeurs de résistance les plus faibles sont obtenus à partir de spécimens conservés dans l'air quel que soit le taux de substitution de la fumée de silice.

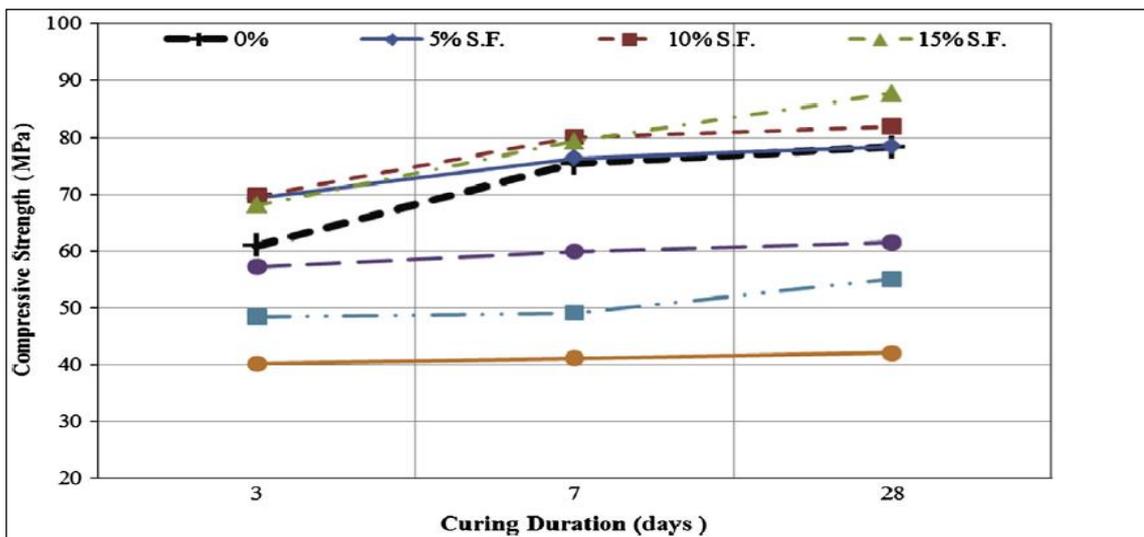


Figure 2.19: Effet de la durée de cure dans l'eau sur la résistance à la compression des BAP [85].

L'étude réalisée par Boukni [86] afin d'investiguer le comportement des BAP à base de fillers calcaires (FC) vis-à-vis des températures élevées a consacré une partie sur l'évolution des propriétés mécaniques des bétons ayant subi un traitement thermique à jeune âge à des températures de 40 et 60° pendant 24h. Les essais de résistance à la compression ont permis de mettre en évidence que l'augmentation de la température de la cure a permis d'obtenir des résistances plus importantes aux jeunes âges. Par contre, des températures trop élevées peuvent modifier la structure des hydrates et dégrader les résistances après 7 jours.

## 2.9. Effet du climat chaud sur la durabilité des BAP

### 2.9.1. Carbonatation

D'après Zhao et al. [84], les profondeurs de carbonatation de BAP augmentent de 3 jours à 28 jours d'âge. Une faible profondeur de carbonatation a été observée à 3, 7, 14 et 28 jours de 0 mm ; 0,6 mm ; 1,4 mm et 2,9 mm respectivement (Figure 2.20). L'augmentation de la température et la diminution de l'humidité ( $T=28^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=85\%$ ) donne une profondeur de carbonatation inférieure à celui de l'environnement standard de ( $T=20^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=95\%$ ) et l'environnement humide de ( $T=20^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=100$ ). Une bonne corrélation existe entre la résistance à la compression à 28 jours et la profondeur de carbonatation à 28 jours du BAP dans des différentes conditions de cure (Figure 2.21).

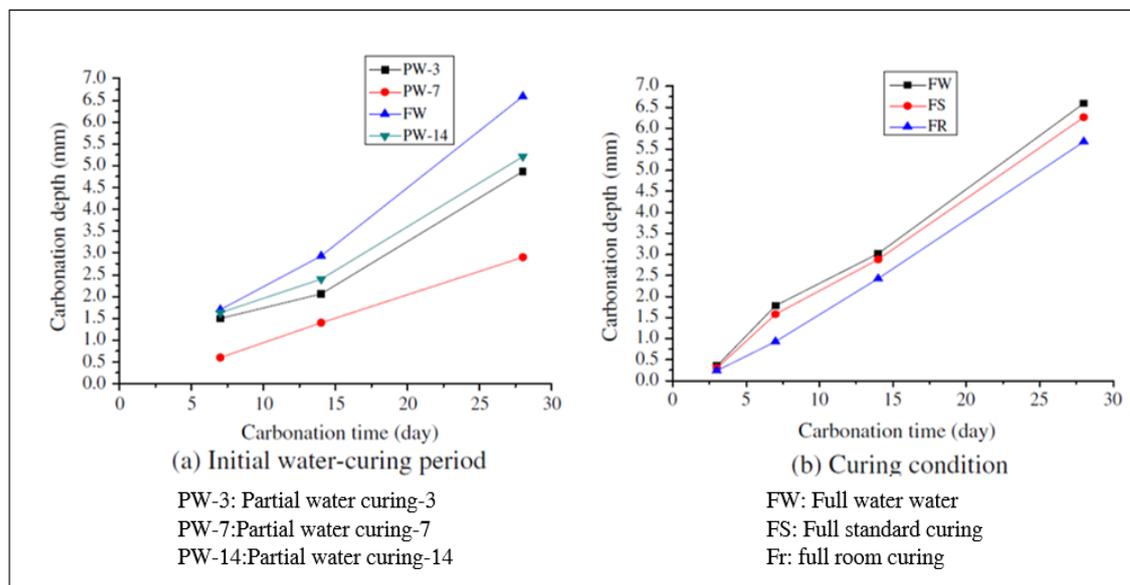


Figure 2.20: Profondeur de carbonatation dans des différentes initiale et conditions de cure [84].

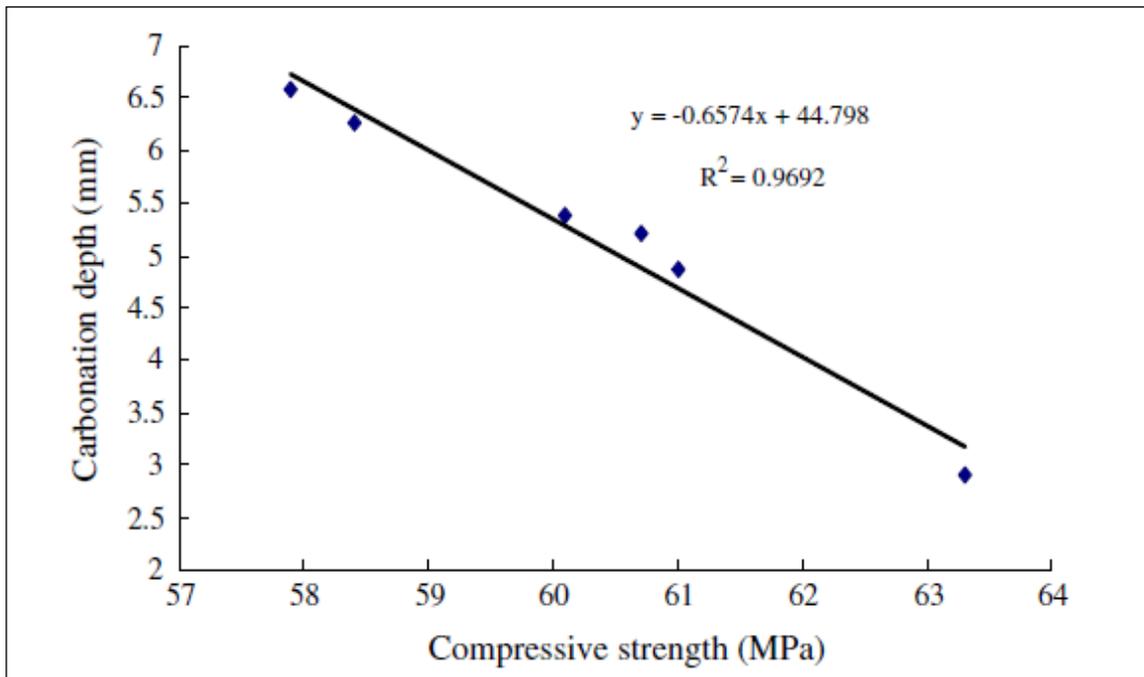


Figure 2.21: Corrélation entre la résistance à la compression et profondeur de carbonatation des BAP [84].

### 2.9.2. Diffusion des ions du chlorure

Plusieurs chercheurs ont montré que l'utilisation des bétons au laitier contribue au raffinement des pores et la diminution de la perméabilité. Mais peu d'études traitent de l'évolution de la résistance à la diffusion des ions chlore dans les BAP ayant subi des températures élevées de cure. Les résultats obtenus par Zhu et al. [71] révèlent que les BAP ont une meilleure résistance aux ions chlore que les BV pour une résistance donnée. Le coefficient de diffusion des ions chlorure des BAP avec durcissement en eau pendant une période initiale de cure de 3, 7 et 14 jours sont respectivement de  $2.08 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $2.077 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $4.276 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Le BAP soumis à une durée de cure de 7 jours présente le plus faible coefficient de diffusion des ions chlorure (Figure 2.22).

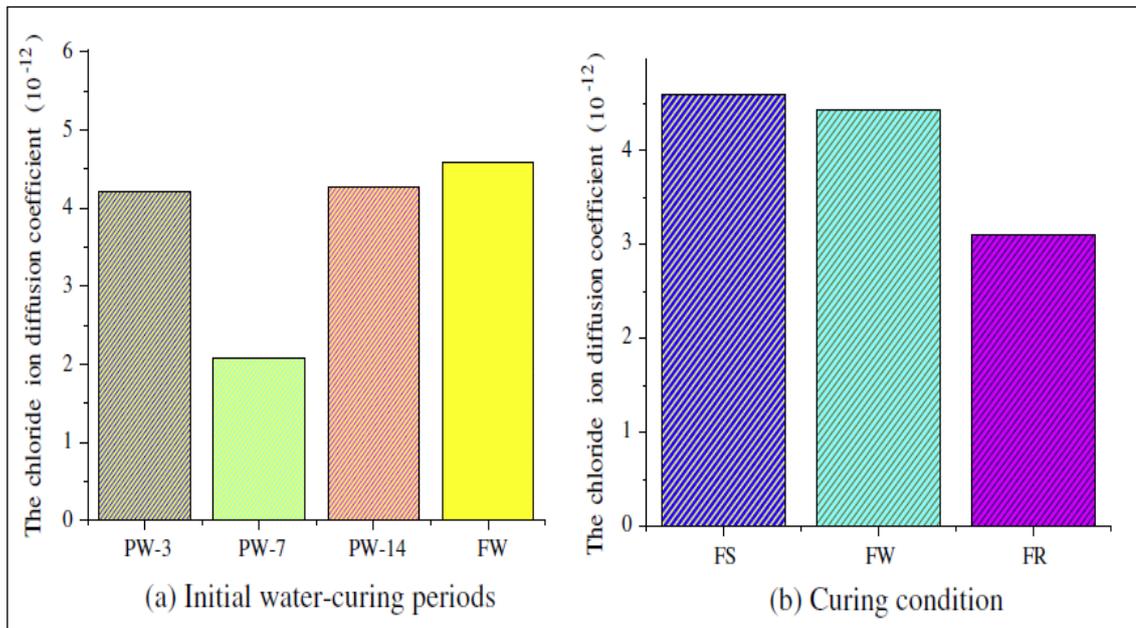


Figure 2.22 : Diffusion des ions du chlorure des BAP après une cure initiale et dans différentes conditions de cure [71].

La pénétration des chlorures pour les spécimens traités à l'air est considérablement inférieure à ceux traités dans l'eau de mer. Les bétons à base du laitier ont une porosité inférieure à celle des bétons à base de ciment portland. C'est une indication que l'incorporation du laitier dans les mélanges de béton entraîne la formation d'une microstructure plus dense dans la matrice de pâte de ciment [87]. El-Chabib et Ibrahim [88] ont mesuré la pénétration des ions chlorure par conductivité électrique sur des bétons très fluides (étalement supérieur ou égal à 580mm) à l'âge de 56 jours. Les bétons contenant des substitutions variables au ciment de combinaisons diverses entre laitier, cendre volante (calcique ou siliceuse) et fumée de silice (utilisation d'un superplastifiant polycarboxylate, E/C fixés à 0,30 et à 0,33 pour deux séries de bétons). Tous les bétons ont été soumis à une cure humide de 7 jours (température du laboratoire non précisée et  $HR \geq 95\%$ ) puis, jusqu'à l'essai, laissés soit à l'air libre à la température du laboratoire, soit placés dans une étuve à  $46^\circ\text{C}$ , le jour, et dans le laboratoire à la température ambiante, la nuit. Les auteurs ont montré que la cure à température élevée entraîne des susceptibilités plus faibles à la migration. Cette observation est vraie quelle que soit la composition étudiée.

Zhao et al. [84] observent que le coefficient de diffusion d'un BAP (OPC + cendre volante + superplastifiant de type polycarboxylate) à l'âge de 28 jours n'est pas modifié même si les bétons sont soumis depuis leur confection à des températures de  $28-32^\circ\text{C}$  ( $75-85\%HR$ ) (Figure 2.23).

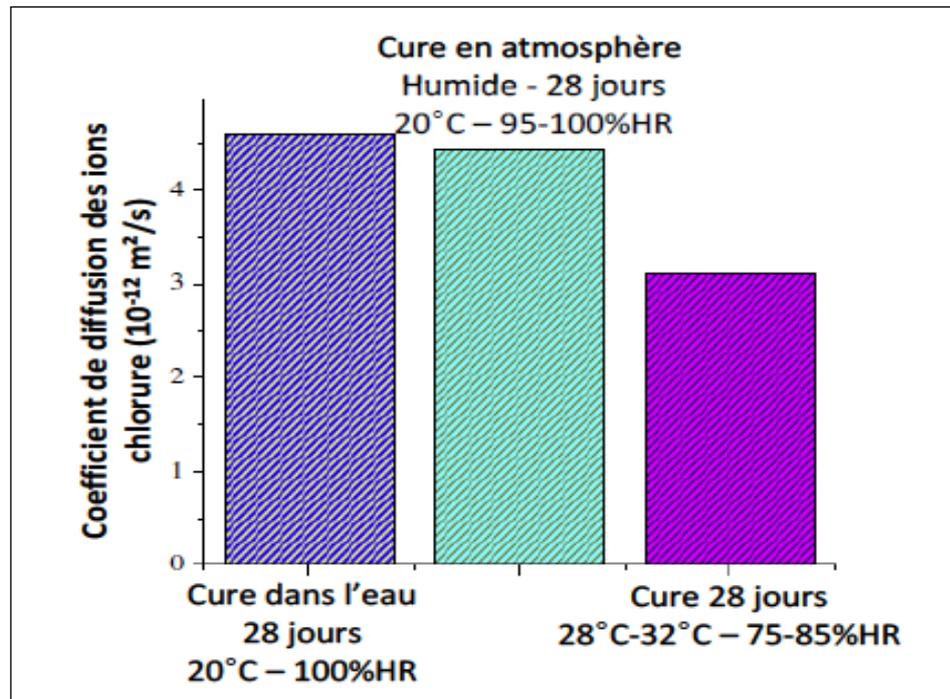


Figure 2.23: Coefficient de diffusion des ions chlore d'un BAP après 28 jours [84].

L'incorporation de laitier de haut fourneau dans le BAP a entraîné une baisse de coefficient de diffusion des ions chlore par rapport au BAP de référence. En outre, l'augmentation du taux de substitution de cendres volantes et le laitier de haut fourneau de 0% à 30% diminue le coefficient de diffusion des ions chlore de BAP considérablement [89].

### 2.9.3. Absorption capillaire

Turkmen et Kantarci [83] ont montré que le coefficient de capillarité dépend de la durée et des conditions de cure ainsi que du pourcentage de granulats légers expansés (expanded perlite aggregate EPA). Une bonne corrélation a été observée entre la sorptivité des BAP et la résistance à la compression. La résistance à la compression des bétons augmente en raison de l'hydratation et la sorptivité diminue en conséquence indiquant une microstructure plus dense (Figure 2.24). La porosité apparente des BAP à l'air libre augmente avec l'augmentation du rapport de granulats légers expansés (EPA) dans différentes conditions pour 28 jours de cure (Figure 2.25).

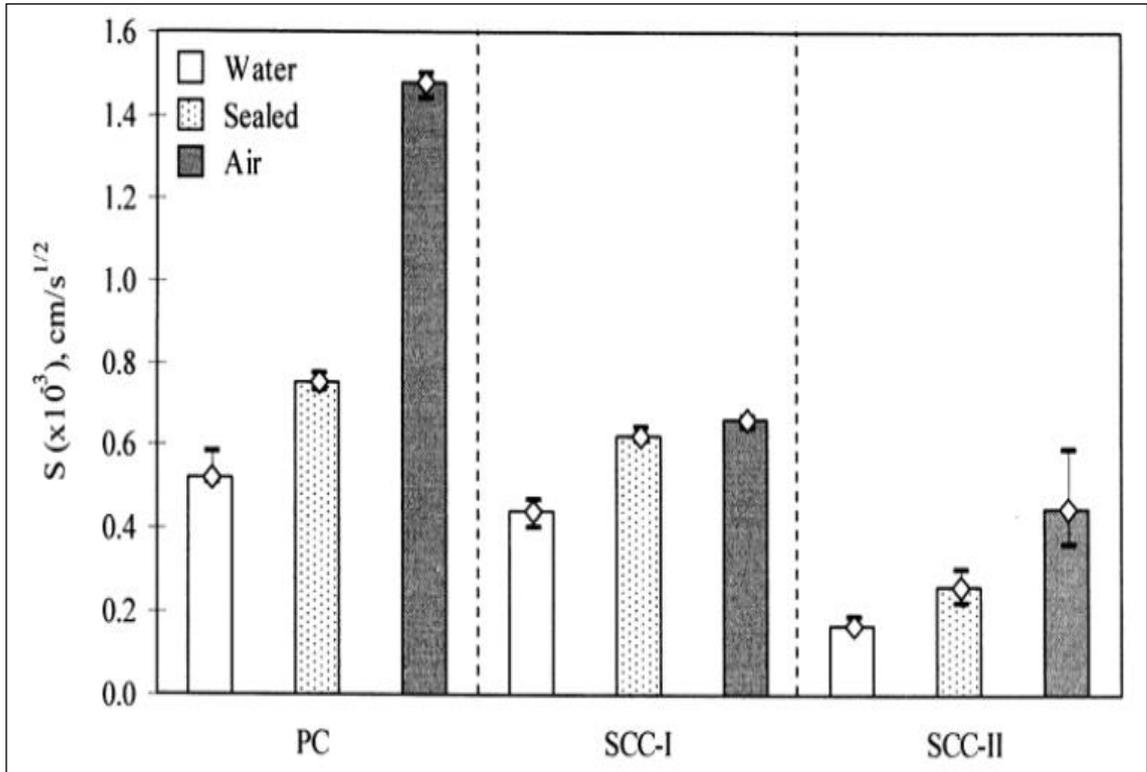


Figure 2.24: Sorptivité des bétons dans des différentes conditions de cure [83].

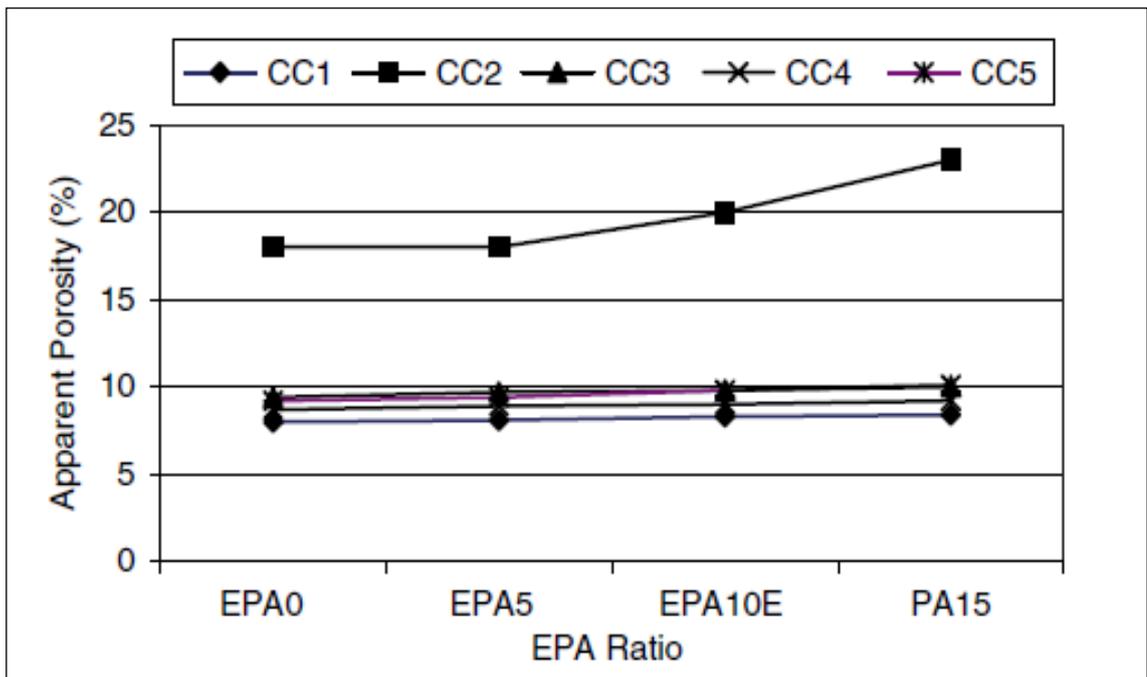


Figure 2.25: Effets de pourcentage de granulats légers sur la porosité apparente sous des conditions différentes de cure à 28 jours [83].

#### 2.9.4. Porosité

La porosité présente une évolution typique dans le temps, en fonction de la température de mûrissement. On distingue deux périodes : à très jeune âge, plus la température est basse, plus la porosité est élevée, ce qui s'explique par une cinétique lente de l'hydratation. On observe une inversion des tendances avec des porosités d'autant plus fortes que la température augmente [90].

Reinhardt et Stegmaier [91] ont étudié l'influence de la température sur la porosité (mesurée par intrusion au mercure) de BAP à maturité équivalente à 3 jours de cure isotherme à 20°C. Ils ont constaté que l'élévation de la température ne modifie pas significativement la porosité totale (figure 2.26) mais qu'elle agit sur la répartition des pores en augmentant la quantité des petites tailles de pores capillaires (au voisinage de 0,1µm). L'hydratation accélérée par la température diminue la porosité dans les premiers âges du béton.

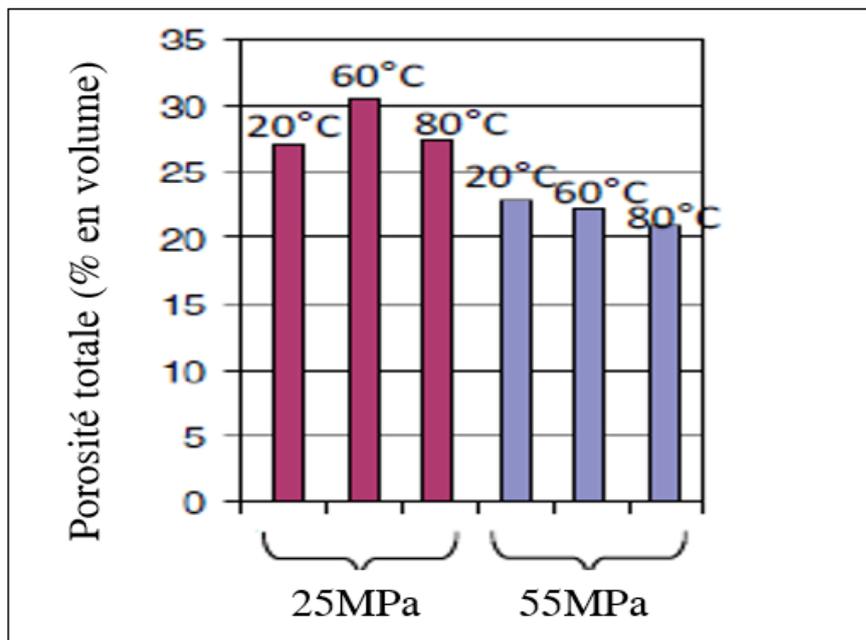


Figure 2.26: Porosité totale de BAP conservés à 20°C, 60°C et 80°C [91].

L'application des cycles avec une température maximale de 70 ° C pourrait avoir un effet négatif sur la durabilité du BAP. Cela pourrait être dû à une formation rapide de gel C-S-H et de cristallin CH qui aboutit à une hétérogénéité et une structure de pores plus grossière [78]. L'utilisation des additions minérales actives modifiait de manière significative la microstructure des pâtes des BAP menant à améliorer les performances physiques et mécaniques des bétons. Les conditions de cure appliquées sur les échantillons de BAP aux

jeunes âges ont modifié le réseau poreux. Les échantillons de pâte qui ont été couverts avec un film plastique (pas d'évaporation de l'eau) avaient un plus petit diamètre moyen des pores, mais une porosité plus grande par rapport aux échantillons exposés à l'air [92].

#### 2.9.5. Retrait

L'effet de la cure humide sur le retrait endogène des bétons contenant des laitiers est très faible si on le compare au retrait endogène développé dans les bétons n'ayant pas subi de cure humide [46]. Oliveira et al. [93] ont focalisé leur travail principalement sur l'influence de la cure sur le retrait total. Les résultats montrent également que la durée de cure est très bénéfique pour minimiser le retrait au jeune âge. La cure provoque une perte de masse de séchage plus faible qui a un effet de retard dans le développement du retrait.

#### 2.10. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée dans le but de faire le point sur l'effet du climat chaud sur les performances des bétons autoplaçants. Ainsi, nous nous sommes intéressés aussi à l'influence du laitier sur les caractéristiques des BAP à l'état frais (mobilité en milieu non confiné, mobilité en milieu confiné, la stabilité et rhéologie) et en particulier à l'état durci. L'analyse bibliographique a montré que l'incorporation des additions minérales comme le laitier et les cendres volantes améliorent les propriétés des BAP aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Elles présentent une distribution porosimétrique plus dense, qui conduit à une diminution de la taille des pores et leurs substitutions à des taux optimaux bien étudiés aux ciments contribuent à une amélioration de la durabilité des bétons. Les études rapportées se restreignent essentiellement pour faire le point sur l'état des connaissances relatives aux caractéristiques à l'état frais et à l'état durci des bétons autoplaçants formulés à base d'additions minérales lorsqu'il est mûri dès les premières heures à des températures élevées. Cependant, la performance des BAP en climat chaud est peu étudiée. Le climat chaud affecte négativement les performances des bétons.

## CHAPITRE III :

### MATÉRIAUX ET ESSAIS

#### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du béton et la procédure expérimentale. On décrit ainsi les méthodes d'essais réalisés.

#### 3.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

##### 3.2.1 Le Ciment

Dans cette étude nous avons utilisé un ciment composé type CEM II/A 42.5 fabriqué par la cimenterie de Lafarge à M'sila en Algérie. Sa résistance minimale en compression à 28 jours est de 42,5 MPa avec une résistance à la compression à 28 jours de 45.55MPa. La résistance à la compression a été réalisé sur un mortier normalisé [EN 196-1][94]. La composition physique et mécanique de ciment est présentée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques physiques du ciment

| $\rho_{abs}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\rho_{app}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | SSB<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Consistance<br>(%) | Début de prise (h) | Fin de prise (h) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 3040                                 | 1050                                 | 3000                        | 28.7               | 2.50               | 4.36             |

Tableau 3.2 : Composition chimique de ciment

|           |                  |                                |                                |       |      |                 |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|
| Composant | 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> |
| Taux(%)   | 18,66            | 4,59                           | 2,85                           | 61,59 | 1,80 | 2,16            |
| Composant | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O              | Cl-                            | PAF   | MV   |                 |
| Taux(%)   | 0,67             | 0,15                           | 0,02                           | 7,87  | 3,03 |                 |

##### 3.2.2 Le laitier

Dans cette étude, un laitier granulé de haut fourneau du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Wilaya d'Annaba) a été utilisé comme addition. Ce laitier est obtenu par refroidissement par jet d'eau (trempe à l'eau) et chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de grains sphériques de classe granulométrique 0/5 mm, de couleur jaune clair (Figure 3.1).



Figure 3.1 : Laitier granulé de haut fourneau utilisée : (1) avant broyage, (2) après broyage.

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions du BAP, nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à 50 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et ainsi faciliter son broyage. Ensuite, un broyage total a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets (Figure 3.2) d'une capacité de 5 kg. Enfin, la quantité finale de laitier obtenue après le broyage a été mélangée dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Dans notre étude, une seule finesse du laitier de 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$  est utilisée. La masse volumique apparente du laitier est de 956  $\text{kg}/\text{m}^3$  et sa masse volumique absolue est 2850  $\text{kg}/\text{m}^3$ . L'analyse chimique de laitier est donnée dans le Tableau 3.3.



Figure 3.2 : Broyeur à boulet utilisé.

Tableau 3.3: Composition chimique du laitier d'El Hadjar [95]

| Elément | Si O <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ca O  | Mg O | Mn O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | Ti O <sub>2</sub> |
|---------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|------------------|-----------------|-------------------|
| %       | 40,10             | 6,00                           | 2,00                           | 42,20 | 4,70 | 2,60 | 1,20             | 0,15            | 1.20              |

Les normes européennes définissent des limites sur la composition chimique du laitier de haut fourneau granulé et broyé. La norme EN 197-1 [96] exigent, pour la fabrication des ciments composés, que :

- le laitier granulé soit constitué d'au moins deux tiers, en masse, de la somme des oxydes CaO, MgO et SiO<sub>2</sub>.

-Le rapport en masse (CaO + MgO)/ (SiO<sub>2</sub>) dépasse 1,0

Ce rapport assure une alcalinité élevée, qui permet au laitier d'avoir une bonne hydraulicité [97]. En effet, l'activité hydraulique du laitier est liée à son alcalinité, qui est définie d'une manière générale par le rapport pondéral de la somme des oxydes basiques à la somme des oxydes acides. Cependant, dans la littérature, l'indice de basicité est défini en deux catégories [98] :

Basique : si l'indice est supérieur à 1,0 ou Acide : si l'indice est inférieur à 1,0.

Les indices de basicité « $M_b$ » indiquent si un laitier est basique ou acide. Les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$M_{b1} = \frac{\% \text{ Cao} + \% \text{ Mgo}}{\% \text{ SiO}_2} = 1.17 \quad 3.1$$

$$M_{b2} = \frac{\% \text{ Cao}}{\% \text{ SiO}_2} = 1.05 \quad 3.2$$

$$M_{b3} = \frac{\% \text{ Cao} + \% \text{ Mgo}}{\% \text{ SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} = 1.01 \quad 3.3$$

Pour notre cas, l'indice de basicité du laitier ( $M_b > 1$ ), Donc le laitier est basique.

Parmi les facteurs qui influent sur le pouvoir hydraulique du laitier granulé sont en général au nombre de trois :

- La composition chimique (elle nécessite des quantités suffisantes en chaux et en alumine),

- Le degré de vitrification (dissolution des produits amorphes),
- La surface spécifique (surface de contact eau-laitier).

L'indice hydraulique (taux ou degré de vitrification : la richesse du laitier en éléments silicatés) sert d'indication de l'activité hydraulique du laitier de haut fourneau et le laitier est généralement classé selon cet indice (Tableau 3.4). L'indice d'activité est calculé par la méthode de Keil selon la formule suivante :

$$\alpha = \frac{Sp \times F}{1000} \quad 3.4$$

Avec :

$S_p$  : Surface spécifique de Blaine des fines du laitier,

F : pourcentage des fines du laitier.

Tableau 3.4 : Indice d'Activité hydraulique du laitier granulé [99]

| Classe | L'indice hydraulique $\alpha$ | Type de laitier |
|--------|-------------------------------|-----------------|
| 1      | $\alpha < 15$                 | Très Pauvre     |
| 2      | $15 < \alpha < 40$            | Pauvre          |
| 3      | $40 < \alpha < 55$            | Acceptable      |
| 4      | $55 < \alpha < 85$            | Bon             |
| 5      | $85 < \alpha < 100$           | Très Bon        |
| 6      | $\alpha > 100$                | Excellent       |

Le laitier granulé d'El-Hadjar a un coefficient  $\alpha$  moyen de 44 (laitier acceptable).

Le diagramme DRX du laitier granulé effectué par Arabi et al. [100] et présenté sur la figure 3.3, montre que sa structure est presque entièrement amorphe où les pics sont difficilement identifiables. Une bande angulaire comprise entre 25 et 35° (2) est attribuée à une proportion importante de verre (amorphe). Toutefois, des traces de mellilite, de merwinite et probablement de la monticellite à la position 2 = 27.7°, identifiables sur des portions de laitier mieux cristallisé : certains agglomérats de laitier ont subi probablement

une cristallisation partielle. En plus de ces minéraux, on peut noter la présence de quelques traces de quartz, de calcite et d'oxyde de fer dans ce même laitier.

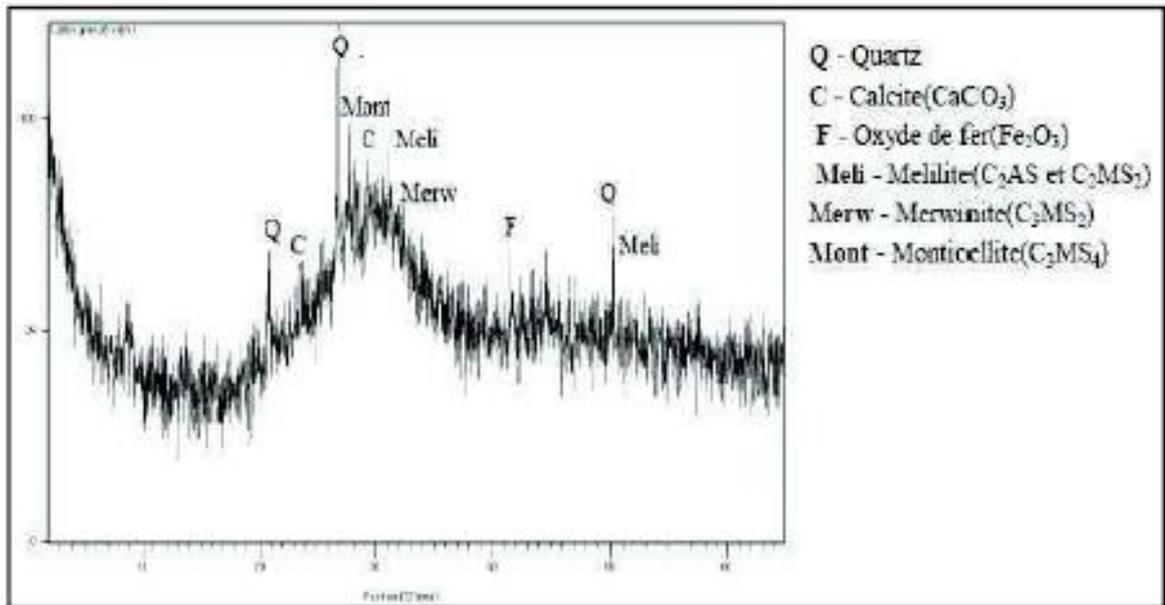


Figure 3.3 : DRX du laitier granule d'El-Hadjar [100].

Le laitier cristallisé est déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau et refroidit à l'air libre ; il se présente sous forme de granulat de 0 à 20 mm après concassage [44].

Laifa et al. [101] ont montré l'existence d'une phase vitreuse. Le refroidissement lent du laitier ne peut être uniforme dans toute la masse, les couches au contact de l'air refroidissent plus rapidement et constitue la partie vitreuse du laitier cristallisé.

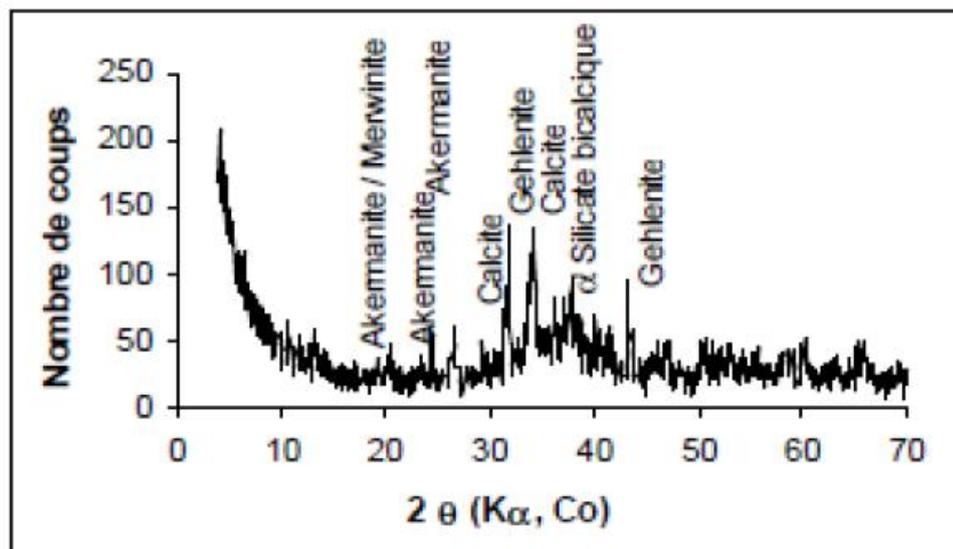


Figure 3.4 : DRX du laitier cristallisé d'El-Hadjar [101].

### 2. 2. 3 Le sable

Le sable utilisé est un mélange de deux sables : le premier sable provenant de Baghlia et le deuxième provenant de Boughezoul. Les caractéristiques de ces sables sont représentées dans le tableau 3.5 ci-dessous :

Tableau 3.5: Caractéristiques physiques et mécaniques du sable corrigé

| Sable   | S/Boughezoul | S/Baghlia | S/Mélange |
|---|--------------|-----------|-----------|
| Classe granulaire (mm)  | 0/3          | 0/5       | Mélange   |
| Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) (kg/m <sup>3</sup> ) | 1413         | 1652      | 1531      |
| Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )   | 2542         | 2560      | 2584      |
| Coefficient d'absorption (%)                                    | 0,56         | 0,69      | 0,64      |
| Module de finesse   | 1,68         | 3,32      | 2,8       |
| Composition (%)   | 42,25        | 57,75     | 100       |
| Equivalent de sable visuel (%)                                  | 67,63        | 82,27     | 77,08     |
| Equivalent de sable au piston (%)                               | 70,65        | 86,20     | 80,15     |

### 3. 2. 4 Le gravier

Le gravier utilisé dans cette étude provient de la région de Sétif. Deux classes de graviers ont été utilisées pour la confection des bétons étudiés. Ils présentent respectivement une granulométrie 3/8 et 8/15. Le tableau 3.6 résume les caractéristiques principales du gravier. Les courbes granulométriques du sable et du gravier utilisé sont données dans la figure 3.5.

Tableau 3.6 : Caractéristiques physique de gravier

|           | Classe granulaire (mm) | $\rho_{app}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | $\rho_{abs}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Coefficient d'absorption (%) |
|-----------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Granulats | 3/8                    | 1492                              | 2715                              | 0,5                          |
|           | 8/15                   | 1482                              | 2700                              | 0,5                          |

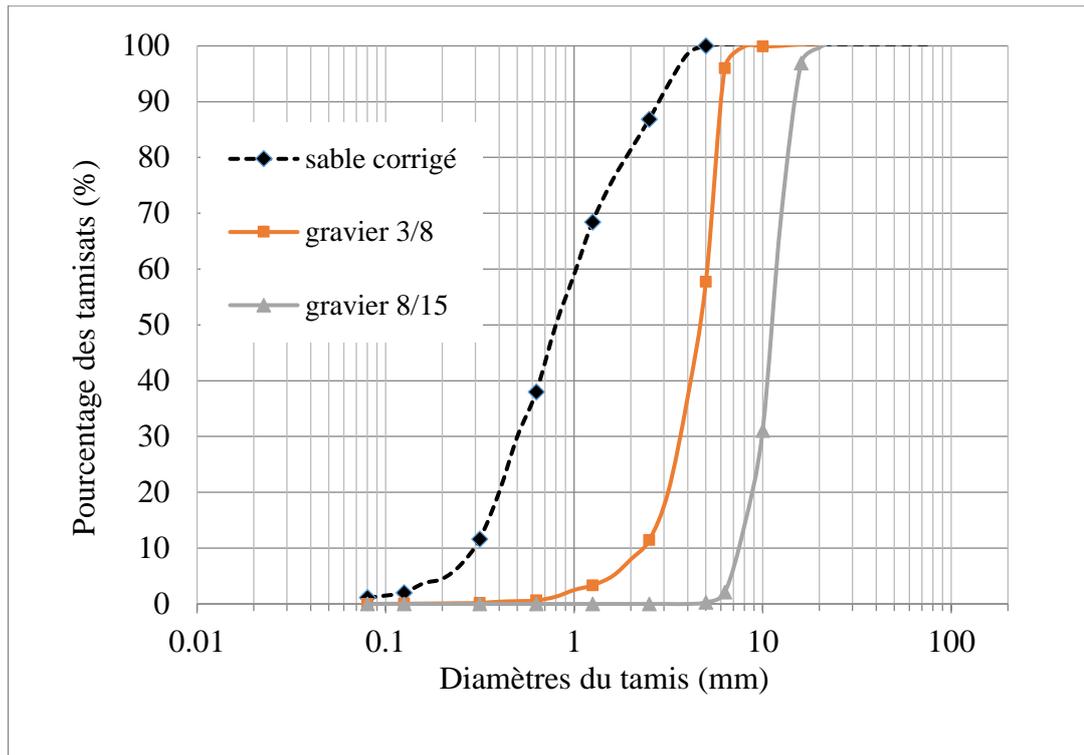


Figure 3.5 : Courbe granulométrique du sable et gravier naturels.

### 3.2.5 L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau du robinet, propre et exempte d'impuretés. L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés [102] qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, corrosion des armatures, etc.) [103].

### 3.2.6 Les superplastifiants

Les adjuvants permettent d'obtenir une grande fluidité et une parfaite homogénéité nécessaire à l'obtention d'un BAP. Le superplastifiant utilisé pour les mélanges de béton est un superplastifiant et haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates. Les polycarboxylates sont des molécules ayant un double effet pour la dispersion des particules [23]. Le superplastifiant choisi, de dénomination commerciale MEDAFLOW 30 de la société Granitex, est un produit adapté pour les applications des BAP. Il se présente sous forme d'un liquide avec une plage de dosage comprise entre 0,5% à 2% en masse de poudre. Sa densité est de 1,06, sa teneur en ions chlorures est inférieure à 0,1% et il possède entre 28,0 et 31,0 % d'extraits secs.

### 3.3 Formulations adoptées

Dans la littérature existe plusieurs approches de formulation. Pour répondre aux exigences d'ouvrabilité des BAP. La méthode que nous avons choisi dans notre étude c'est la méthode japonaise d'Okamora qui vise l'optimisation du mortier [104,105]. L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériau de la gâchée, afin d'obtenir le béton qui aura les propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant, qui est fixé dans cette étude à 0.40. Le dosage en superplastifiant a été optimisé par des essais sur mortier afin d'obtenir un mortier autoplaçant homogène et stable qui nous permet de formuler notre BAP.

#### 3.3.1. Formulation du mortier autoplaçant

Le but de ce travail de formulation du mortier autoplaçant a pour but d'optimiser le dosage en superplastifiant. La formulation des mortiers autoplaçants est déterminée à partir d'un programme excel d'aide à la formulation [95]. Le rapport E/L est constant et la seule variable étant le dosage en superplastifiant. Le dosage en superplastifiant est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur mortier frais afin d'obtenir un étalement de 270 à 330 mm pour tous les MAP et un temps d'écoulement V-funnel entre 2 et 6 sec [106].

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été calculées d'après l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A [95]. La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du mortier dont la procédure est comme suit (Figure 3.6) :

- Malaxer à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d'homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité),
- Malaxer pendant une minute avec la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau),
- Malaxer pendant une minute avec le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant,
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

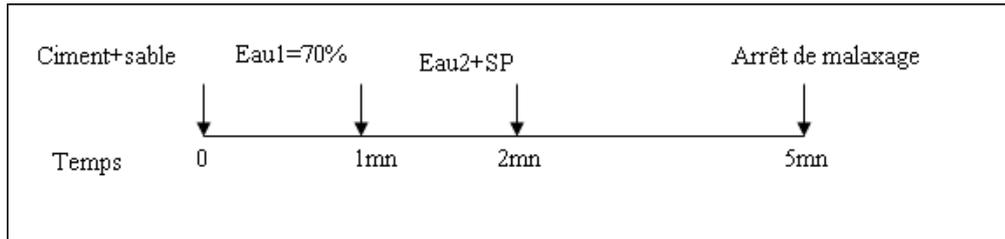


Figure 3. 6 : Séquence de malaxage du mortier [95].

### 3.3.2 Essais réalisés sur MAP

#### 3.3.2.1. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'appareil se compose d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur, un diamètre du haut de 70 mm et du bas de 80 mm [106]. L'essai d'étalement s'agit de remplir le moule tronconique placé au centre d'une plaque en acier horizontale lisse, une fois le moule est soulevé et le mortier s'écoule sur la plaque. Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne. ( $D_{\text{moyen}}$ ). Le ( $D_{\text{moyen}}$ ) est calculé comme suit :

$$D = \frac{D1 + D2}{2} \quad 3.5$$

La figure 3.7 montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



Figure 3.7 : Essai d'Étalement pour Mortier.

### 3.3.2.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) permet d'évaluer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de béton passant à travers l'ouverture d'un entonnoir, consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (Figure 3.8).



Figure 3.8 : Essai à l'Entonnoir en V pour Mortier.

Plusieurs travaux montrent que lorsque la valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et le temps d'écoulement compris entre 2 et 6 s produisent un MAP réussi [106].

### 3.4 Essais réalisés sur béton autoplaçant à l'état frais

La formulation du béton a été basée sur la méthode Japonaise dite la méthode générale et la formulation du béton autoplaçant est déterminée à l'aide d'un programme Excel Annexe B [95] en tenant compte des différentes données relatives aux matériaux utilisés.

Trois familles ont été étudiées, à savoir un BAP sans ajouts choisi comme béton de référence et deux BAP l'un avec 15% de laitier et l'autre avec 25% de laitier. Douze formulations ont été étudiées à savoir pour chaque pourcentage de laitier, nous avons étudié quatre modes de cure (0, 3, 7 et 28 jours).

Le BAP a été formulé à partir des mêmes constituants, avec le même squelette granulaire et un rapport E/L constant. Le dosage en superplastifiant a été vérifié à partir des essais sur béton frais. Une fois le béton est prêt, on procède aux essais d'ouvrabilité dans l'ordre suivant: essai d'étalement au cône d'Abrams, essai de l'entonnoir (V-Funnel), essai de la

boite en L, essai de stabilité au tamis. Par ailleurs la fabrication se déroule conformément à la procédure indiquée sur la figure 3.9 :

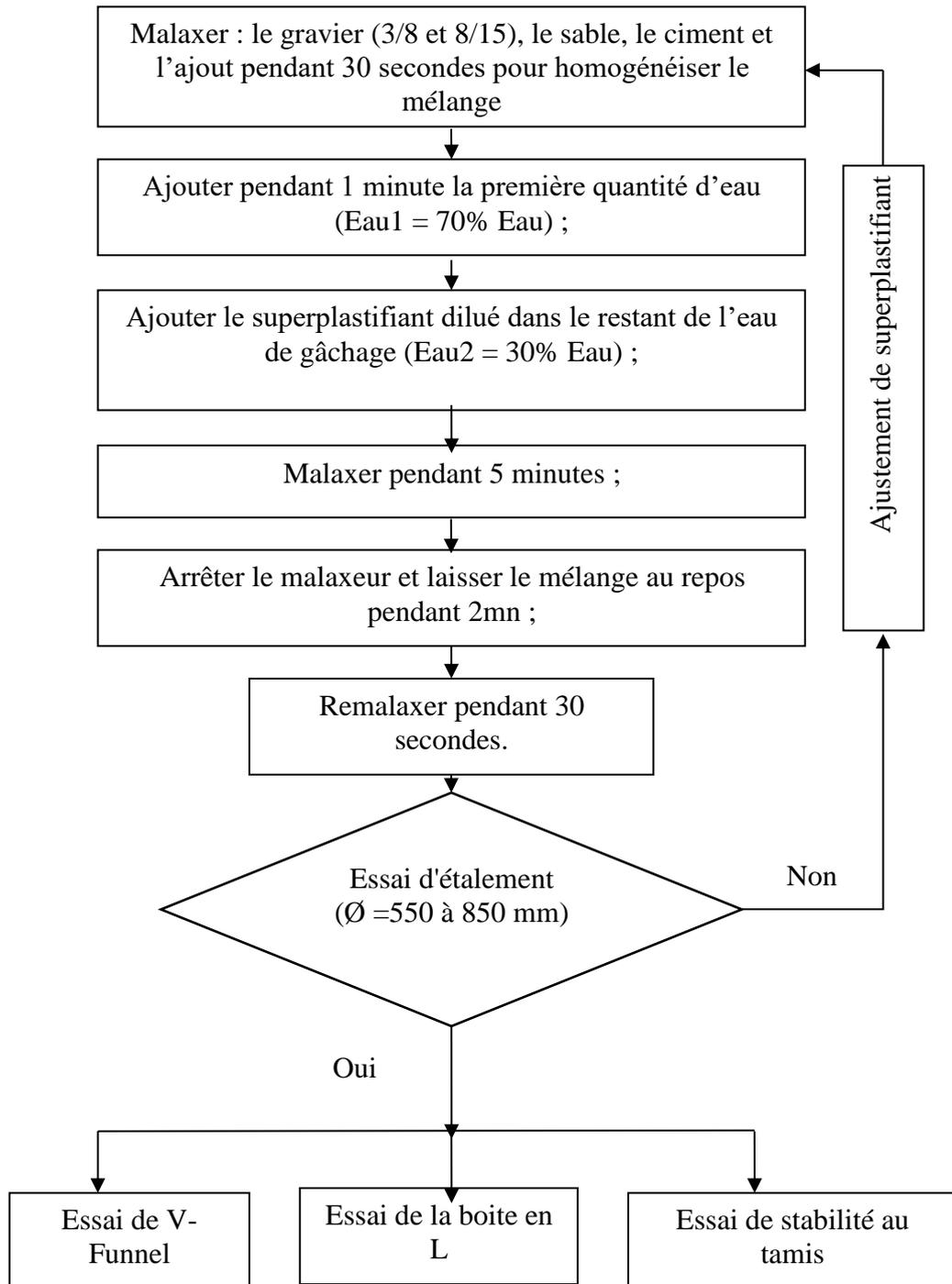


Figure 3. 9 : Séquence du malaxage du béton autoplaçant.

La qualité du béton à l'état frais a été vérifiée selon les recommandations de l'AFGC [30]. Différents essais spécifiques permettent de caractériser le BAP à l'état frais. Les essais présentés ci-dessous caractérisent les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais qui ont été réalisés dans le cadre de cette étude.

#### 3.4.1. Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement permet de mesurer le diamètre l'étalement au cône d'Abrams. On remplit un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée (Figure 3.10). Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton. Le premier résultat de cet essai est exprimé par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton obtenue. Il nous renseigne sur la déformabilité du béton. Cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50 cm, et qui nous renseigne sur la vitesse d'étalement du béton.

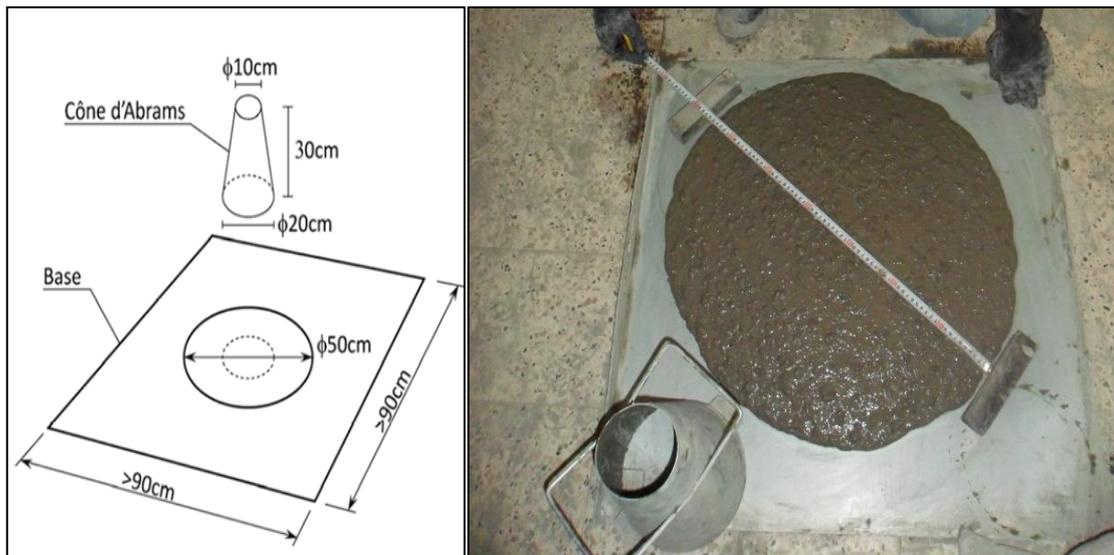


Figure 3.10 : Essai d'étalement.

Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement [95,106]. La recommandation d'AFGC [30] prévoit une répartition des BAP en trois classes (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Classes d'étalement [30]

| Classe | Étalement (mm) |
|--------|----------------|
| SF1    | 550 à 650      |
| SF2    | 660 à 750      |
| SF3    | 760 à 850      |

### 3.4.2. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Cet essai consiste à étudier la mobilité du béton en milieu confiné. L'essai d'écoulement au V-Funnel, dont les dimensions sont définies (Figure 3.11) mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée. Ce temps d'écoulement est un critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Il s'agit de remplir l'entonnoir de béton, puis on le laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit la lumière par l'orifice.

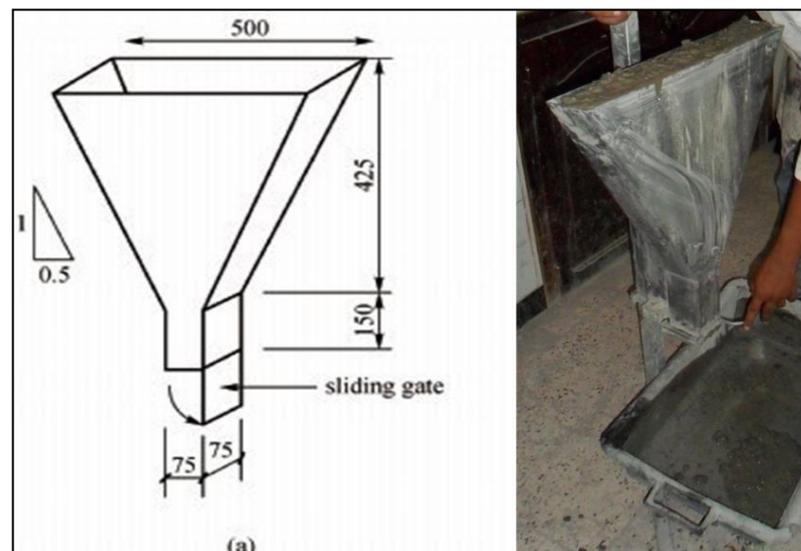


Figure 3. 11: Essai V-funnel.

### 3.4.3. Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L fait partie des essais de caractérisation de la mobilité en milieu confiné. Il vérifie que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.

Un échantillon de béton est rempli en une seule fois dans la partie verticale de la boîte. Après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers une série d'armatures séparant la partie verticale et la partie horizontale de la boîte formée de 3 barres d'armatures de diamètre  $\phi 16\text{mm}$ . Le résultat est représenté par le ratio  $H2/H1$  qui doit être supérieur à 0,80 (Figure 3.12).

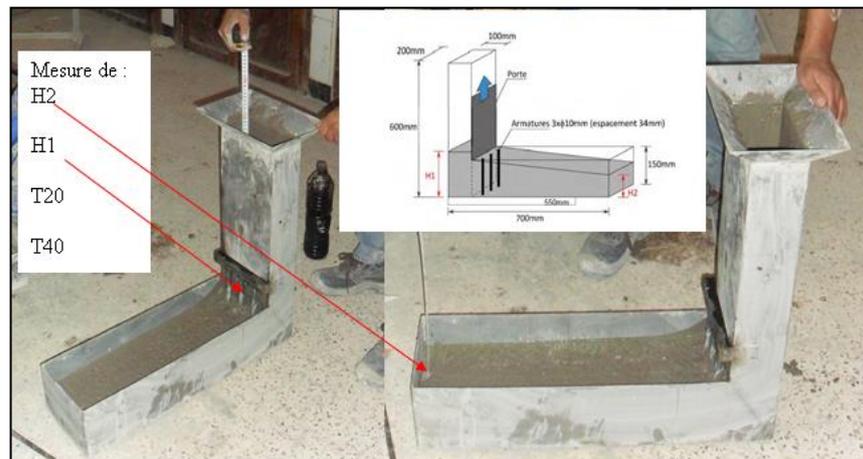


Figure 3.12 : Essai de la boîte en L.

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton  $T_{20}$  pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton  $T_{40}$  pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2 (Figure 3.12).

#### 3.4.4. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

Cet essai caractérise la ségrégation des bétons autoplaçants. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [30]. L'essai nécessite un seau de 10 litres avec un couvercle, un tamis de maille 5 mm, un fond et une bascule avec précision (Figure 3.13).

Un échantillon de 10 litres de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser  $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$  de l'échantillon sur un tamis de 5 mm posé sur le fond avec une

hauteur de 50 cm  $\pm$  5 cm. Après 2 min d'attente, on pèse le poids de laitance qui est traverser le tamis et on calcule le pourcentage de la laitance selon l'expression :

$$\%_{Laitance} = \frac{P_{Laitance}}{P_{Echantillon}} \times 100 \quad 3.6$$



Figure 3.13 : Essai de stabilité au tamis.

Pour qu'un béton soit qualifié autoplaçant, il doit satisfaire les différents essais de caractérisation adoptés par les recommandations d'AFGC [30], le tableau 3.8 résume les valeurs préconisées pour un BAP.

Tableau 3.8 : Essai de caractérisation des BAP à l'état frais [30]

| Essai                     | Recommandation AFGC      |
|---------------------------|--------------------------|
| Essai d'étalement SF (mm) | $550 \leq SF \leq 850$   |
| T50 (sec)                 | $2 \leq T50 \leq 6$      |
| V-funnel (sec)            | $6 \leq Tv \leq 12$      |
| L-Box                     | $\frac{H2}{H1} \geq 80$  |
| Stabilité au tamis (%)    | $0 \leq \pi(\%) \leq 15$ |

### 3.4.5. Essai rhéologiques

Il existe une grande variété de rhéomètres à bétons pour caractériser le comportement des bétons à l'état frais. Dans notre étude le rhéomètre à bétons Heidolph- RZR 2102 Control Z est utilisé comme rhéomètre pour identifier les paramètres rhéologiques des bétons autoplaçants frais.

Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon vane à quatre pales de 15 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 30x30cm, présenté sur la figure 3.14. Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Le schéma de la figure 3.15 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur. La vitesse de rotation de l'outil est imposée et les contraintes résultantes sont mesurées. Les données sont directement exportées vers une feuille de calcul Excel (affichage en temps réel) [32,107].

Le rhéomètre peut fonctionner en imposant des taux de cisaillement appliqués sur béton d'où on obtient les contraintes de cisaillement. A partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de BAP. Ce rhéomètre peut être assimilé également à un rhéomètre couette cylindrique. L'outil vane joue le rôle du cylindre intérieur et la paroi de la cuve remplace le cylindre extérieur. La géométrie vane est généralement précise pour la mesure de seuil de cisaillement. Les utilisateurs ne considèrent généralement que l'utilisation du vane conduit à des surestimations de contraintes liés aux effets de bords du vane (dilatance durant la mise en cisaillement). Il est donc nécessaire de tenir compte de cet effet lors de la mesure des paramètres rhéologiques, en particulier en phase de mise en place de l'écoulement. De plus, la vane provoque une localisation du cisaillement qui peut induire une migration des granulats du béton vers des zones moins cisailées ou favorisée une ségrégation verticale (effet de sédimentation) [108].

Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de BAP frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre [109].

Le principe de l'essai, peut être résumer comme suit:

- ✓ On verse le BAP préparé dans le récipient ;
- ✓ On fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier.
- ✓ On démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié à l'aide du logiciel.



Figure 3.14: Rhéomètre Heidolph-RZR 2102.

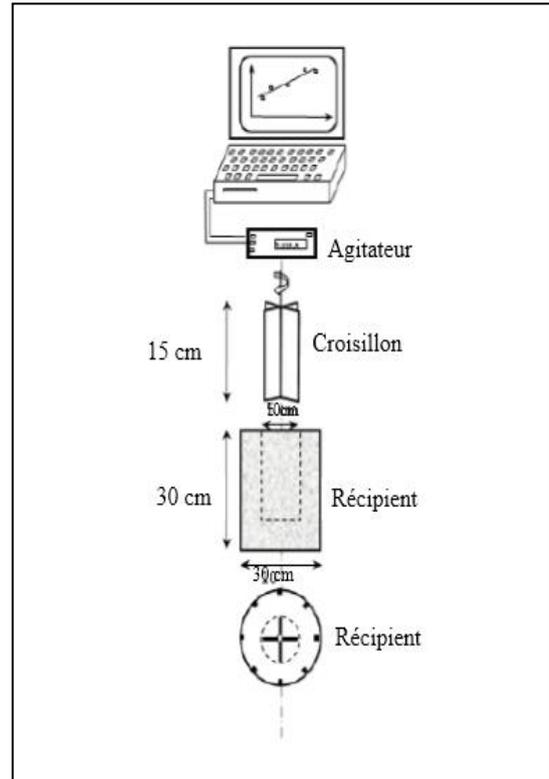


Figure 3.15 : Schéma descriptif du rhéomètre.

Le profil de vitesse choisi permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires ( $\Omega$ ,  $M$ ). Le profil de vitesse est illustré sur la figure 3.16 [107].

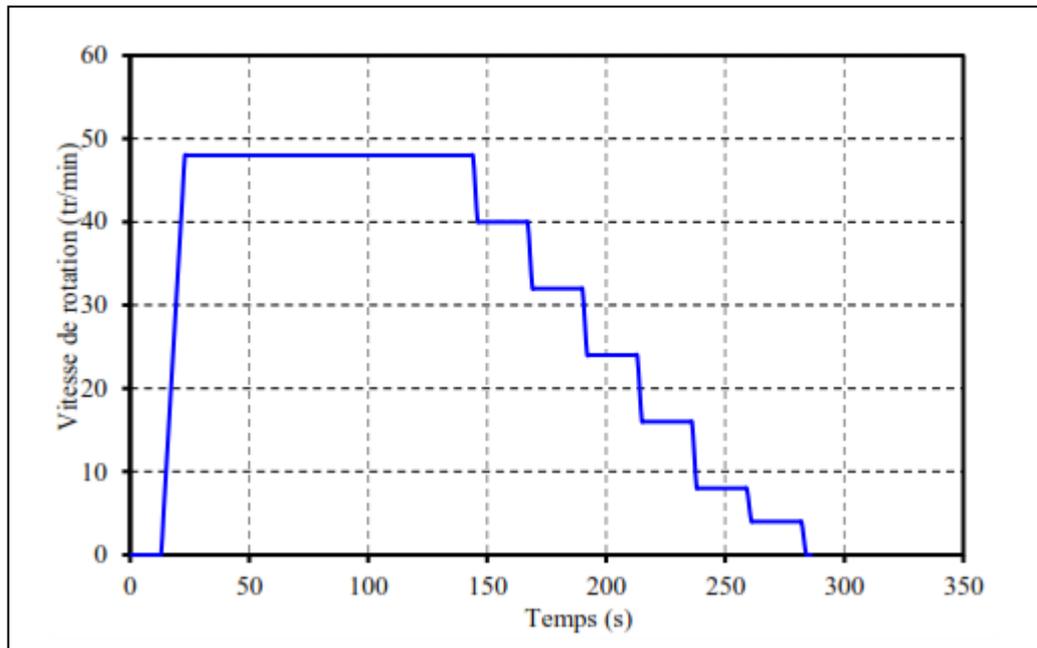


Figure 3.16: Profil de vitesse [107].

### 3.5 Mode de cure

La cure est la procédure utilisée pour maintenir une quantité d'humidité suffisante et une température favorable dans le béton durant l'hydratation du ciment si bien que les propriétés désirées sont développées. Durant les premières 24 heures qui suivent le coulage, les éprouvettes sont démoulées et soumises uniquement à deux modes de cure jusqu'à l'échéance d'essai. Dans notre étude, Les éprouvettes ont été conservées en respectant deux modes de cure différents :

- Dans l'eau douce, avec 100% de HR et  $T 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  (Figure 3.17), sans échange hydrique avec l'extérieur ; ce sont les conditions de conservation normalisées des éprouvettes de contrôle.
- A l'air libre après une cure humide initiale de 0, 3, 7 et 28 jours (Figure 3.18).

Pour les trois compositions du BAP nous avons confectionné une gâchée pour chaque formulation, le nombre conséquent d'essais à l'état durci ainsi que le nombre important d'éprouvette à réaliser ont conduit à faire une gâchée pour chaque type de conservation.

Nous avons deux pourcentages du laitier (15 et 25%), quatre durée de cure (0, 3, 7 et 28 jours) et nous avons réalisé cinq essais de durabilité (résistance à la compression à 28 et 90 jours,

perméabilité à l'eau, l'absorption capillaire, porosité et la perméabilité aux ions chlore). Le nombre des éprouvettes réalisé est de 216 éprouvettes.



Figure 3.17 : Eprouvettes conservées dans l'eau douce.



Figure 3.18 : Eprouvettes conservées à l'air libre.

### 3.6 Essai réalisés sur béton autoplaçant à l'état durci

#### 3.6.1. Résistance à la compression

La qualité du béton est généralement caractérisée par la mesure de la résistance à la compression. L'importance de cette grandeur en termes de qualité du béton est reliée directement à la composition de la pâte de ciment. La résistance à la compression est déterminée conformément à la norme NF P 18-406 [110]. L'essai de résistance à la compression a été effectué sur une presse de capacité de 3000 kN (Figure 3.19), la vitesse de chargement est de 0.5 kN/s. La résistance en compression des BAP est mesurée sur des éprouvettes cubiques 100x100x100 mm<sup>3</sup> pour chaque mélange du béton à l'âge de 28 et 90 jours. La résistance en compression calculée est la moyenne des résistances obtenues sur trois éprouvettes.



Figure 3.19: Dispositif de l'essai de compression simple.

#### 3.6.2. Absorption capillaire

Cet essai consiste à mesurer le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire des éprouvettes de bétons, non saturés, mise en contact avec l'eau sans pression hydraulique. Avant les mesures de sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées selon les recommandations de la procédure d'ASTM [111]. L'essai a été réalisé sur des échantillons moulés de formes cubiques (100x100x100 mm), les éprouvettes ont été conservées dans une étuve ventilée à 80 ±2 °C, jusqu'à ce que la variation de la masse entre deux pesées soit

inférieure à 0.1%. Les faces latérales des éprouvettes ont été enduites par une résine de type Meda Poxy colle, pour assurer l'écoulement unidirectionnel et éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée.

L'essai de l'absorption capillaire a été réalisé suite à ce pré-conditionnement. Les éprouvettes ont été émergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide des cales (Figure 3.20). A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge, pesées puis relancées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 1mn, 5mn, 10 mn, 20mn, 30mn, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h.

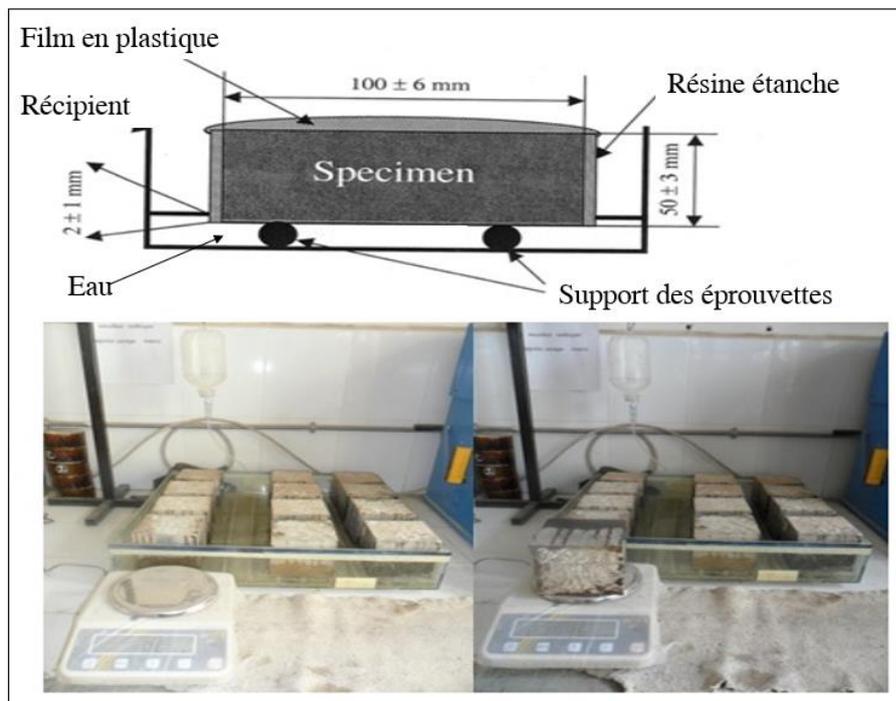


Figure 3.20: Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante :

$$I = \frac{(m_t)}{a \times d} \text{ [mm]} \quad 2.7$$

Où

I : Coefficient d'absorption capillaire (mm) ;

$m_t$  : la différence de masse de l'éprouvette à une échéance donnée (g) ;

a : section de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>) ;

d : densité de l'eau (g/mm<sup>3</sup>).

Le coefficient de sportivité (s) du béton peut être déterminé de l'expression suivante :

$$S = \frac{(Q/A)}{\sqrt{t}} \quad 3.8$$

Où :

A : surface du spécimen en contact avec l'eau en cm<sup>2</sup>,

Q : le volume d'eau absorbé en cm<sup>3</sup>,

t : temps écoulé en (s),

S : coefficient de sorptivité du spécimen en cm/s<sup>1/2</sup>.

On trace Q/A en fonction de  $\sqrt{t}$ , puis on trace la régression linéaire entre Q/A et  $\sqrt{t}$ , puis on calcule les deux pentes des deux lignes droites qui donnent le coefficient de sorptivité (s) des grands pores et des petits pores.

### 3.6.3. Perméabilité à l'eau

Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués selon la norme DIN 1048 [112]. Cet essai permet de mesurer sur des éprouvettes cubiques de dimension 150 mm, la profondeur de pénétration d'eau sous un gradient de pression de 5 bars pendant une période de 72h ± 2 (Figure 3.21). L'essai a été réalisé à l'âge de 90 jours sur des éprouvettes conservées dans deux différents modes de cure. La pression est appliquée sur la surface inférieure au centre d'éprouvette (Figure 3.22). Après 72 heures de l'application de la pression, les spécimens sont ensuite divisés en deux parties par le biais de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). A l'aide d'un pied à coulisse, la profondeur de pénétration de l'eau en hauteur est mesurée (Figure 3.23). L'intervalle des valeurs recommandées pour l'essai de perméabilité à l'eau sont représentés dans le tableau 3.9 ci –dessous.

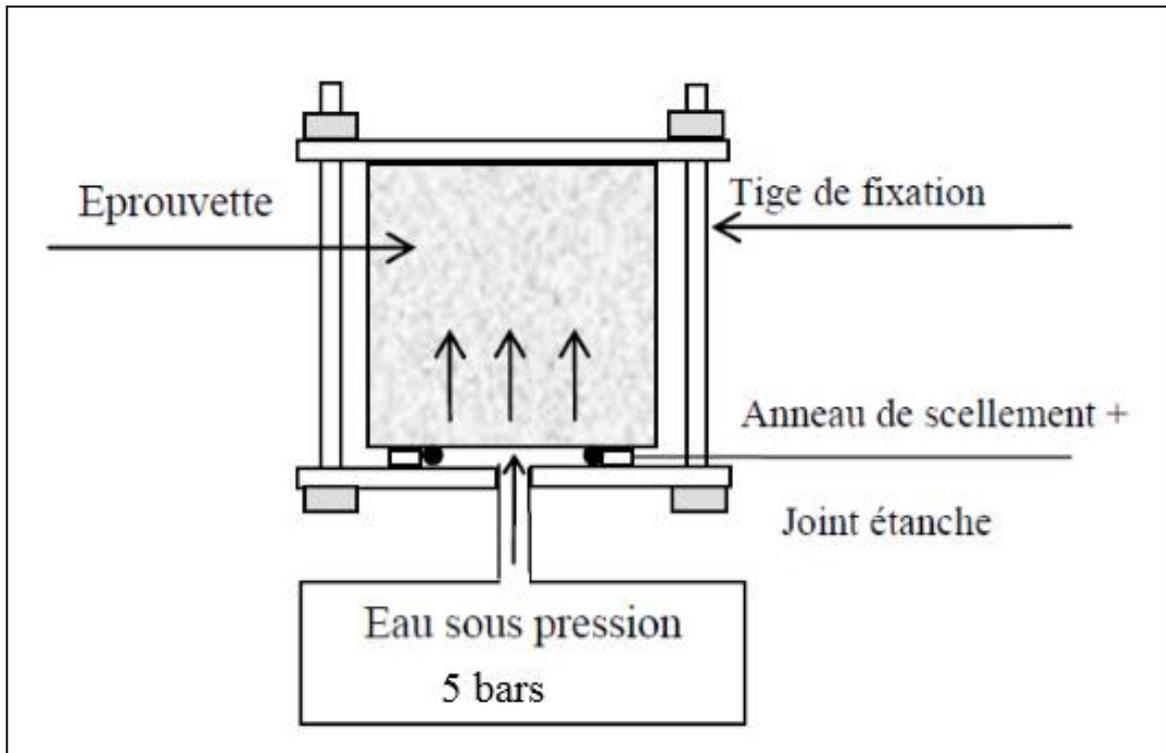


Figure 3.21 : Schéma d'une cellule de pénétration d'eau sous pression.



Figure 3.22 : Essai de perméabilité à l'eau.



Figure 3.23 : Mesure de la profondeur de pénétration d'eau.

Tableau 3.9 : Echelle pour l'essai de perméabilité à l'eau [112]

| Pénétration d'eau (mm) | Perméabilité a l'eau |
|------------------------|----------------------|
| <30                    | Faible               |
| 30-60                  | Moyen                |
| >60                    | Elevée               |

#### 3.6.4. La porosité accessible à l'eau

L'essai permet d'évaluer un volume de pores ouverts accessibles à l'eau. La porosité, notée  $\varepsilon$  (%), correspond au rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent. L'essai de porosité accessible à l'eau a été effectué selon la norme [113]. Les échantillons sont prélevés par sciage transversal en partie médiane d'une éprouvette cylindrique (Figure 3.24). L'essai consiste à déterminer la masse d'un échantillon sec. Pour déterminer la masse sèche, les éprouvettes ont été séchées dans une étuve à une température de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après 24h à l'étuve ne dépasse pas 0.1%. La masse  $M_{\text{sec}}$  de l'éprouvette est mesurée sur une balance au centième de gramme près. L'échantillon est placé dans une enceinte fermée (dessiccateur), sous une pression constante pendant 4 heures. Ensuite l'eau est introduite progressivement jusqu'à remplissage et le corps en béton soit recouvert d'environ 20mm d'eau, puis on déconnecte la pompe (Figure 3.25). Il s'agit de la détermination par pesée de la masse apparente d'un échantillon du béton après immersion dans l'eau avec lequel il a été saturé sous vide. L'échantillon est

maintenu dans la saturation pendant  $18 \pm 2$ h, les éprouvettes ont été sorties du récipient et pesées dans l'eau et dans l'air avec une balance hydrostatique pour déterminer respectivement  $M_{\text{eau}}$  pour  $M_{\text{air}}$ .

La porosité accessible à l'eau,  $\varepsilon$ , est exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \quad 2.9$$

Ou :

$M_{\text{eau}}$  : la masse du spécimen immergé dans l'eau,

$M_{\text{air}}$  : la masse du spécimen pesé dans l'air,

$M_{\text{sec}}$  : la masse du spécimen sec.



Figure 3.24 : Sciage des éprouvettes.



Figure 3.25 : Dispositif de saturation sous vide des éprouvettes.

### 3.6.5. La pénétration aux ions chlore

La résistance à la pénétration des ions de chlorure est évaluée par des essais de diffusion ou migration sous un champ électrique. L'essai a été réalisé selon le mode opératoire de la norme ASTM C-1202 [114] représenté dans la figure 3.26. La préparation des éprouvettes avant l'essai a été réalisé de telle sorte que les faces latérales des éprouvettes ont été enduites par une résine (Meda Poxxy Colle) pour assurer la diffusion unidirectionnelle. Par ailleurs, les échantillons Ø10x20 cm sont sciés pour obtenir trois disques d'épaisseur supérieure à deux fois le diamètre maximal des granulats (Figure 3.27). Ils sont ensuite saturés sous vide dans un dessiccateur étanche sous une pression constante pendant 3 heures, puis on introduit l'eau dégazée de telle sorte que les éprouvettes soient émergées complètement environ 20 mm sous l'eau. Ensuite, la pompe est maintenue en marche pendant une heure supplémentaire. Après l'arrêt de la pompe à vide, les éprouvettes sont conservées sous vide pendant  $18h \pm 2h$  avant lancement de l'essai de la perméabilité.

L'essai consiste à appliquer une différence de potentiel (60V) pendant 6 heures afin de pénétrer les ions par migration et on mesure toutes les 30 minutes l'intensité du courant qui traverse l'échantillon. Pendant l'essai la température a été maintenue constante ( $T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

L'éprouvette cylindrique en béton ( $\text{Ø}100 \times 50 \text{ mm}$ ) est disposée entre deux compartiments contenant en amont une solution en chlorures ( $\text{NaCl}$  3%=12 g/l), et en aval ( $\text{NaOH}$  0.3N =36g/l).

Le résultat de l'essai est une quantité d'électricité (en Coulomb) pour 6 h d'essai (Figure 3.28). Sachant que la quantité d'électricité totale passante est calculée par la formule suivante:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad 2.10$$

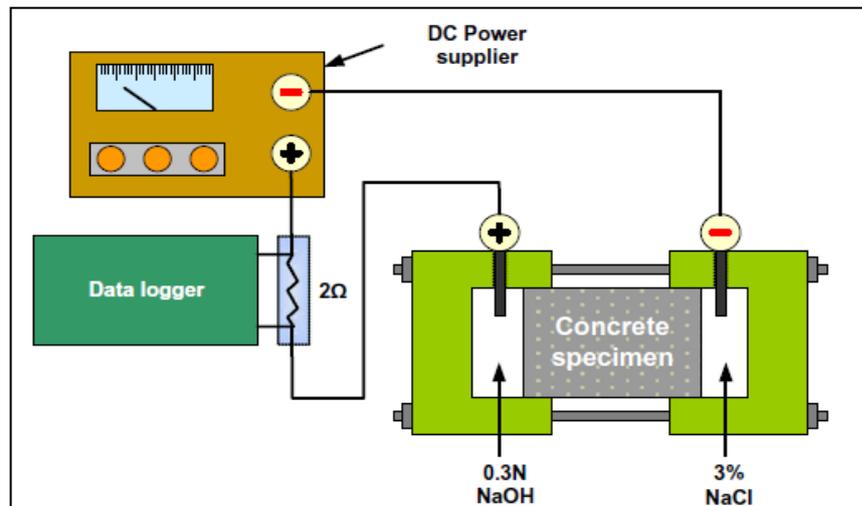


Figure 3.26: Schéma de la cellule de perméabilité aux ions chlore.

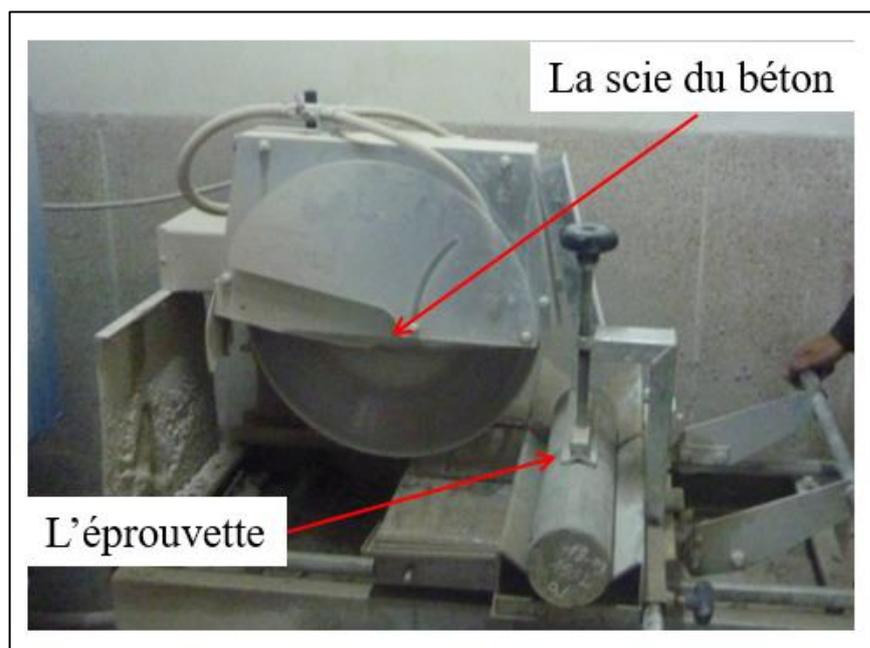


Figure 3.27: Découpage des éprouvettes.

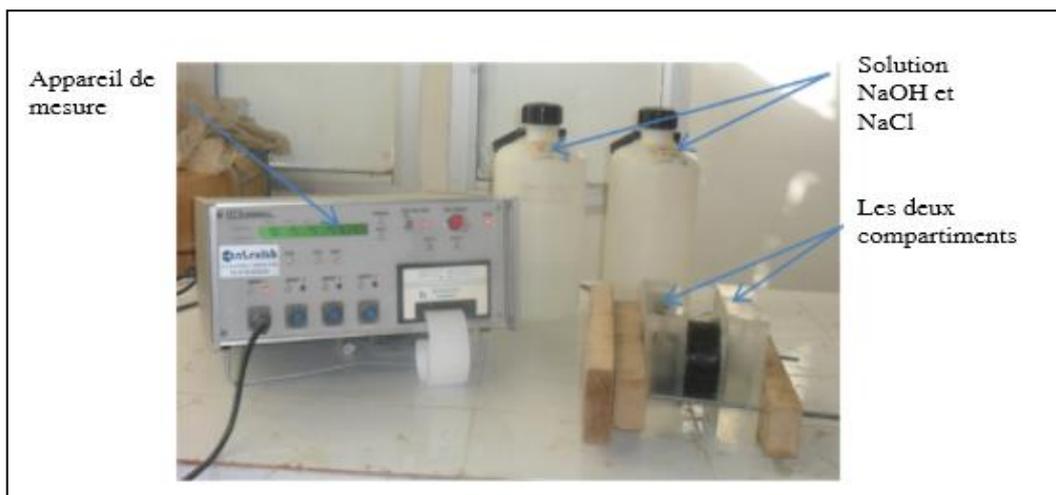


Figure 3.28: Appareil de mesure de la perméabilité aux ions chlore.

### 3.7. Récapitulatif des essais réalisés

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents matériaux utilisés pour la formulation des BAP, leurs propriétés physico-chimiques ainsi que les procédures expérimentales suivies pour atteindre l'objectif de la thèse.

L'étude expérimentale est divisée en deux parties. La première partie expérimentale a été consacrée pour la formulation du béton en se basant sur la méthode japonaise Okamora. En premier lieu, nous avons réalisé deux essais sur mortier dont le but d'optimiser le dosage en superplastifiant. Par la suite nous avons réalisé des essais rhéologiques sur le BAP qui répond aux spécifications requises (Étalement, V-funnel, L-BOX et la stabilité au tamis). Pour qualifier les performances rhéologiques du béton des essais du rhéomètre ont été réalisés. La deuxième partie concerne l'effet du climat chaud et l'effet du laitier substitué au ciment sur la durabilité des BAP. Les pourcentages de laitier utilisés sont de 0, 15, et 25%. Dans notre étude deux modes d'environnements de cure ont été étudiés :

- Cure humide dans l'eau (HR =100% et  $T=20 \pm 2$  °C) ;
- À l'air libre dans la zone de Blida pendant la période d'été, après une cure initiale humide de 3, 7 et 28 jours. La résistance à la compression a été réalisée à 28 et 90 jours, et des essais de durabilité du béton (porosité accessible à l'eau, absorption d'eau, perméabilité à l'eau et perméabilité aux ions chlore).

Le programme expérimental réalisé dans cette étude est résumé sur les figures 3.29 - 3.31.

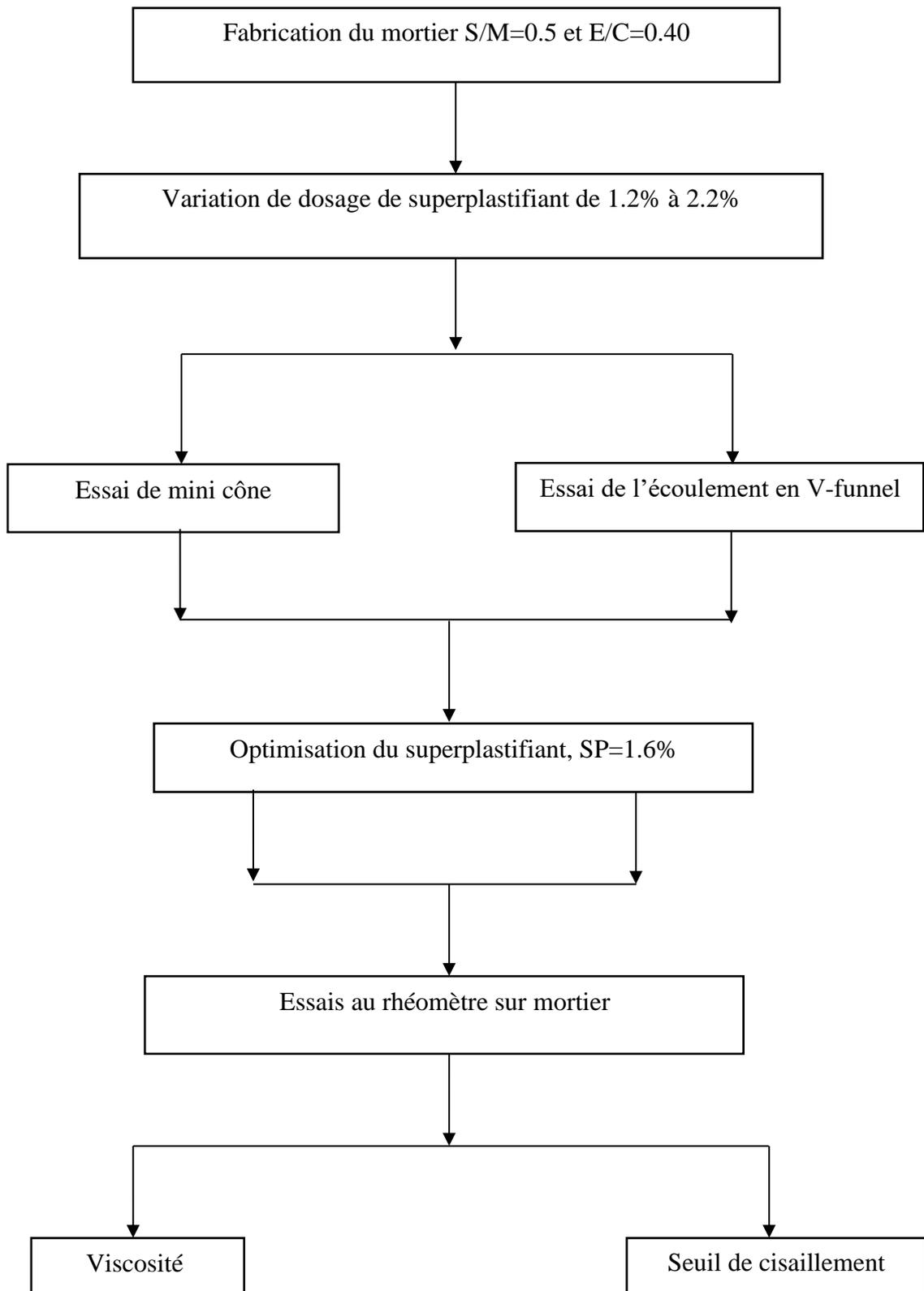


Figure 3.29 : Organigramme des différents essais d'optimisation sur mortier.

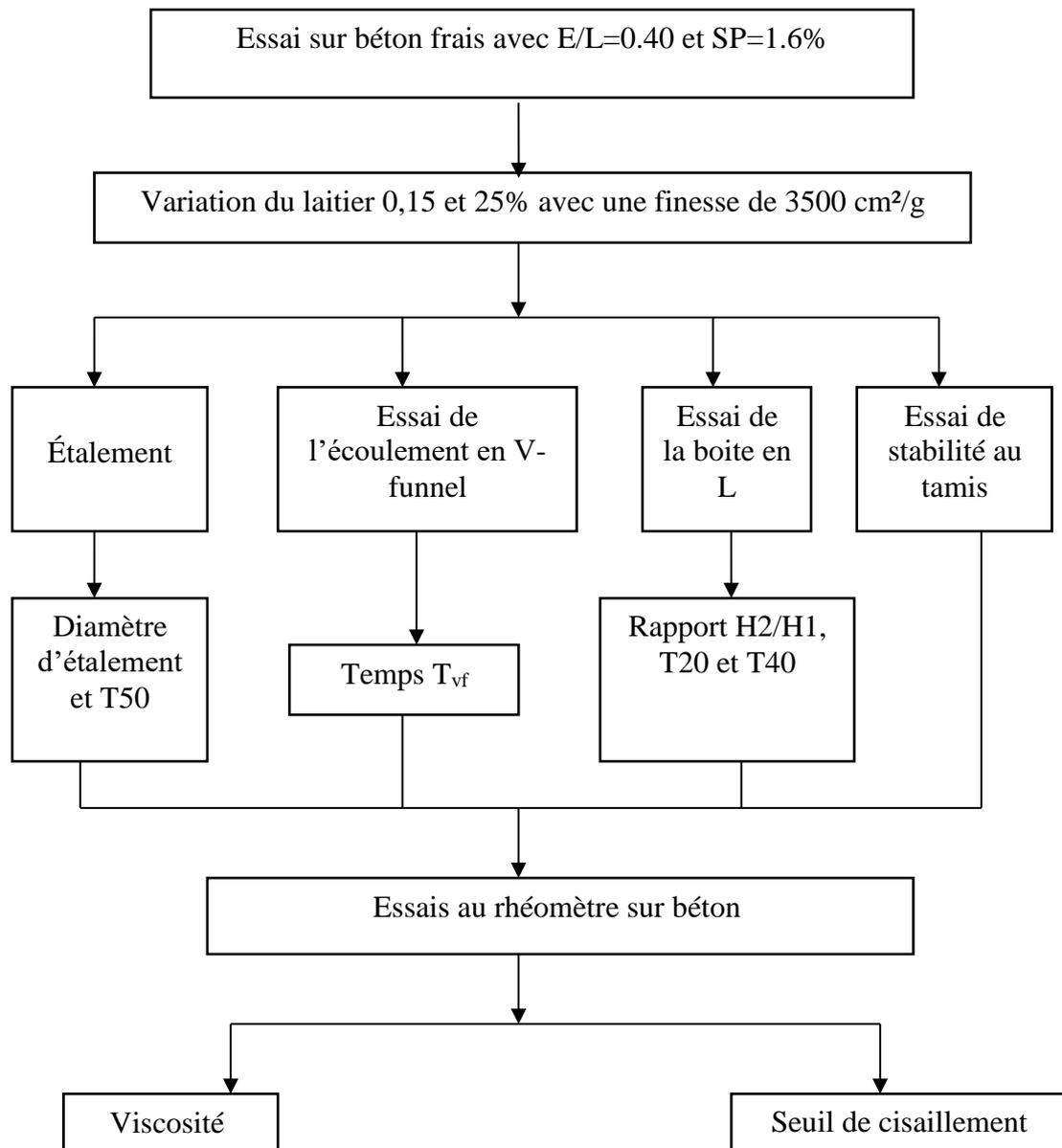


Figure 3.30 : Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état frais.

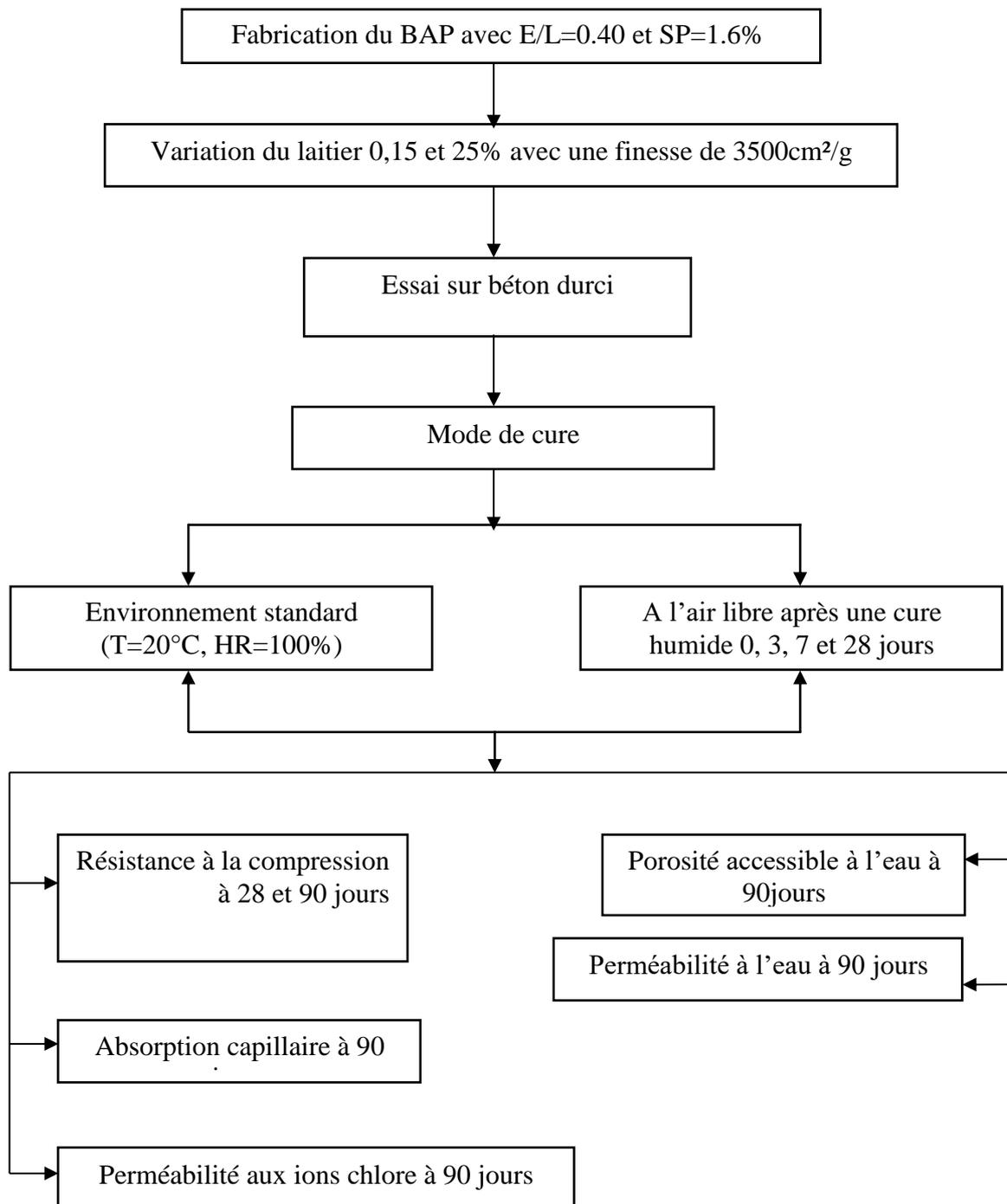


Figure 3.31 : Organigramme des différents essais réalisés sur le BAP à l'état durci.

## CHAPITRE IV :

### RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : ETAT FRAIS ET RESISTANCE MECANIQUE

#### 4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus expérimentalement sur l'effet d'incorporation du laitier à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et la rhéologie du béton. Nous avons commencé par les essais d'optimisation du dosage en super plastifiant afin d'obtenir un MAP que l'on pourra utiliser par la suite dans la formulation du BAP.

En revanche, l'importance de certains paramètres tels que le climat chaud et le type d'addition minérale (laitier) peut conduire à l'apparition d'un désordre important sur les performances mécaniques des BAP dans deux modes de conservations des éprouvettes différentes, soit un environnement standard  $T=20^{\circ}$ ,  $HR=100\%$  (conservation normalisée des éprouvettes de contrôle), soit dans un climat chaud qui varie de ( $25$  à  $45^{\circ}\text{C}$ ) à l'extérieur du laboratoire durant l'été dans la région de Blida.

#### 4.2 Optimisation de dosage du superplastifiant

L'utilisation du superplastifiant permet d'améliorer la rhéologie et réduire la quantité d'eau dans le mélange. En effet, l'optimisation de dosage en superplastifiant évalue la fluidité et la stabilité des pâtes de ciment en comparant différents dosages, pour avoir une fluidité maximale, une meilleure stabilité du béton et assure une bonne ouvrabilité, on a fixé le rapport E/C à 0,40 et le volume du sable à 50% du volume total de mortier [95].

Cette partie expérimentale vise à étudier le comportement rhéologique du mortier, dont le but d'optimiser le dosage en superplastifiant (SP/L) utilisé dans la formulation de notre BAP. En se basant sur l'approche japonaise, nous avons effectué deux essais sur mortier : essai de mini cône et essais V-funnel. Pour chaque dosage de superplastifiant en poids de ciment (1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 ; 2 et 2.2%), des mesures d'étalement et du temps d'écoulement ont été effectuées sur les mortiers correspondants.

Le tableau 4.1 présente les différentes compositions obtenues pour deux litres de mortier en fonction du rapport optimale SP/L.

Tableau 4.1 : Compositions des mortiers obtenues en fonction du rapport optimale SP/L

| Constituants (kg) | MOR 0% laitier | MOR 15% laitier | MOR 25% laitier |
|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Ciment            | 1.369          | 1.172           | 1.038           |
| Laitier           | 0              | 0.194           | 0.324           |
| Sable             | 2.567          | 2.567           | 2.567           |
| Eau               | 0.551          | 0.548           | 0.546           |
| SP 1.6%           | 0.022          | 0.022           | 0.022           |

#### 4.2.1 Effet du superplastifiant sur l'étalement

Les résultats de l'essai d'étalement des mortiers autoplaçants sont présentés dans le tableau 4.2 et illustrés sur la figure 4.1.

La figure 4.1 présente les résultats de l'étalement effectué sur le MAP de référence, en faisant varier le dosage en superplastifiant avec un rapport E/L fixé à 0.4. On constate que chaque dosage de SP permet d'avoir une valeur d'étalement dans l'intervalle d'étalement des MAP définie par Domone et Jin [106]. Les résultats révèlent l'existence d'un dosage optimal, à l'exception du dosage 1.2% qui a donné un étalement inférieur à la limite. En effet, au-delà du dosage 1.6%, de superplastifiant on remarque que les valeurs d'étalement se stabilisent en fonction d'augmentation du pourcentage du SP.

En revanche, on remarque que le diamètre d'étalement augmente avec l'augmentation du dosage en superplastifiant avec l'existence d'un point de saturation en dosage de superplastifiant.

Tableau 4.2 : Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.

| Teneur en superplastifiant (%) | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Etalement (mm)                 | 245 | 277 | 291 | 295 | 300 | 301 |

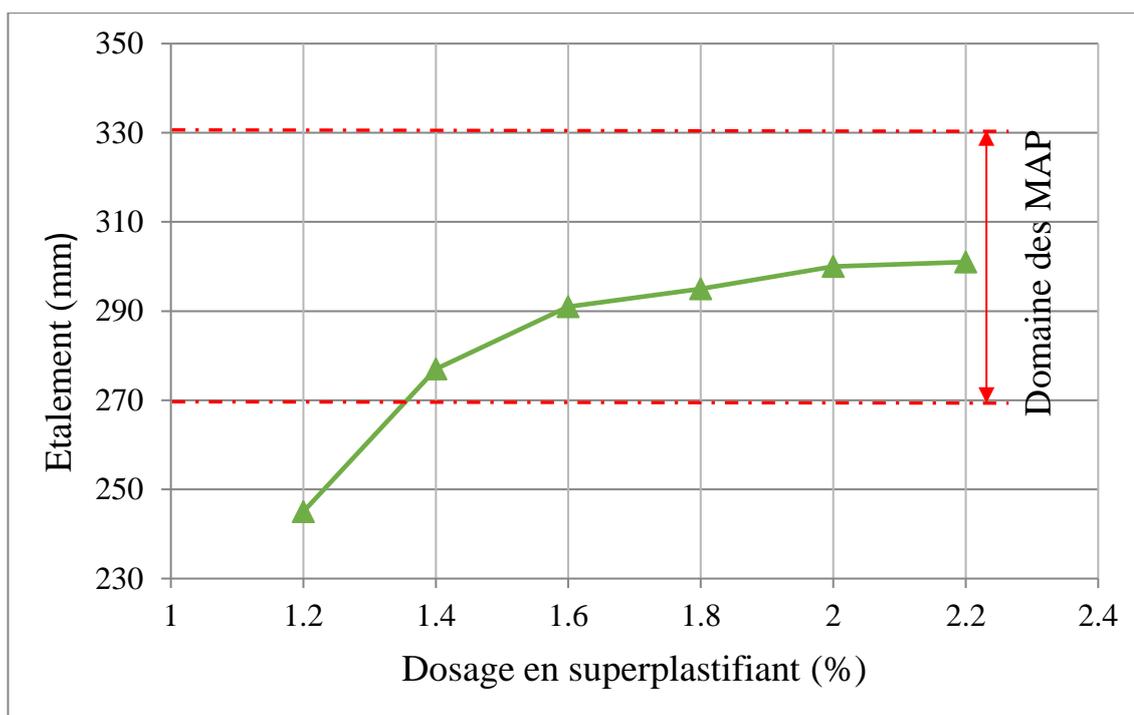


Figure 4.1: Valeurs d'étalement en fonction de dosage de superplastifiant.

#### 4.2.2 Effet de superplastifiant sur le temps d'écoulement (V-funnel)

Les résultats de l'effet de dosage en superplastifiant sur le temps d'écoulement sont représentés dans le tableau 4.3 et illustrés sur la figure 4.2. On remarque que le temps d'écoulement des mortiers à l'entonnoir en V diminue pour les dosages variant de 1.2 et 1.6% en fonction de l'augmentation de la teneur en superplastifiant. Les résultats de temps d'écoulement montrent que tous les dosages vérifient les exigences normatives ( $2 < T_{vf} < 10s$ ) à l'exception du dosage 1.2% qui a donné un temps d'écoulement au V-Funnel plus élevé que 10s. Le dosage en  $Sp/L=1.6\%$  a donné le temps le plus court c'est-à-dire la fluidité la plus importante et la viscosité la plus faible. La régression du temps d'écoulement est très significative pour les dosages variant de 1 à 1.6 %. Le temps d'écoulement commence à se stabiliser à partir du dosage 1.6%. Donc on peut conclure que le dosage optimal de superplastifiant est  $Sp/L=1.6\%$ , est considéré comme point de saturation à partir duquel, toute augmentation de dosage en superplastifiant n'a plus d'influence sensible sur la rhéologie du mortier. Par conséquent, il y a une saturation du système par le superplastifiant. Au-delà de ce point de saturation, tout dosage de superplastifiant ajouté est divisé en une partie consommée par les réactions chimiques et une partie absorbée sur la surface des grains qui n'est pas intégrée dans la composition du produit d'hydratation. Cette partie est la plus importante pour la dispersion des grains par répulsion électrostatique. Saric-Coric [46] a

montré qu'au point de saturation, tous les grains de ciment sont enveloppés d'une couche de polymères et un rajout éventuel de celui-ci n'améliore pas la fluidité, les molécules de superplastifiant restent alors dans la solution comme un surplus qui n'est pas en contact avec les grains de ciment. Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. Le superplastifiant améliore l'ouvrabilité du mélange, mais à partir d'un certain seuil il devient inutile parce qu'il atteint le dosage de saturation qui ne permet pas de modifier de façon significative la rhéologie du mélange. Le maintien rhéologique dépend de la nature du ciment, du type et du dosage en superplastifiant et du rapport eau sur ciment (E/C). Concernant le type de ciment, les différentes réactions chimiques peuvent se produire, une modification de la rhéologie est donc possible selon l'intensité de ces réactions et la teneur en ions de la solution [115].

Tableau 4.3: Valeur de temps d'écoulement en fonction du dosage en superplastifiant

| Superplastifiant (%)     | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0  | 2,2 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| Temps d'écoulement (sec) | 15  | 9,1 | 6,3 | 6,5 | 7,87 | 8   |

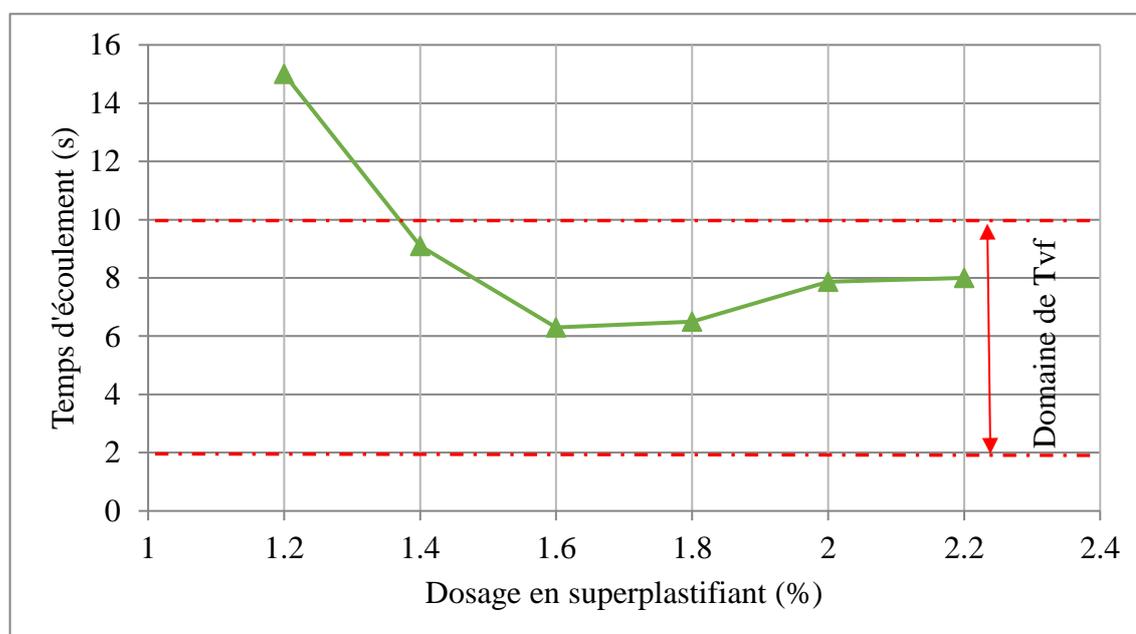


Figure 4.2 : Temps d'écoulement en fonction de dosage de superplastifiant.

### 4.3 Effet du laitier sur l'ouvrabilité des MAP à l'état frais

#### 4.3.1 Etalement au mini cône

Le tableau 4.4 et la figure 4.3 présentent les différents résultats de l'essai au Mini cône concernant la variation de l'étalement du mortier en fonction de la teneur en laitier, pour un dosage en superplastifiant de 1.6%. On remarque une augmentation de l'étalement de la galette du mortier passe de 291 mm à 327 mm (soit une augmentation de 11%) pour des taux de substitution respectifs de 0% à 25% du ciment par le laitier. Tous les résultats que nous avons obtenus sont compris dans l'intervalle défini par Domone [106]. De même, il y'a lieu de noter d'après nos observations visuelles, l'absence de ressuage et de ségrégation au niveau de la galette. Nous avons remarqué également que le pourcentage de 25% de laitier présente l'étalement le plus grand. Selon Shi et al. [56], l'étalement de la galette augmente avec la croissance de la teneur en laitier. Lie et Ding [116] ont montré aussi que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité.

Tableau 4.4: Valeurs de l'étalement au Mini cône

| Teneur en laitier (%) | 0   | 15    | 25  |
|-----------------------|-----|-------|-----|
| Etalement (mm)        | 291 | 317.5 | 327 |

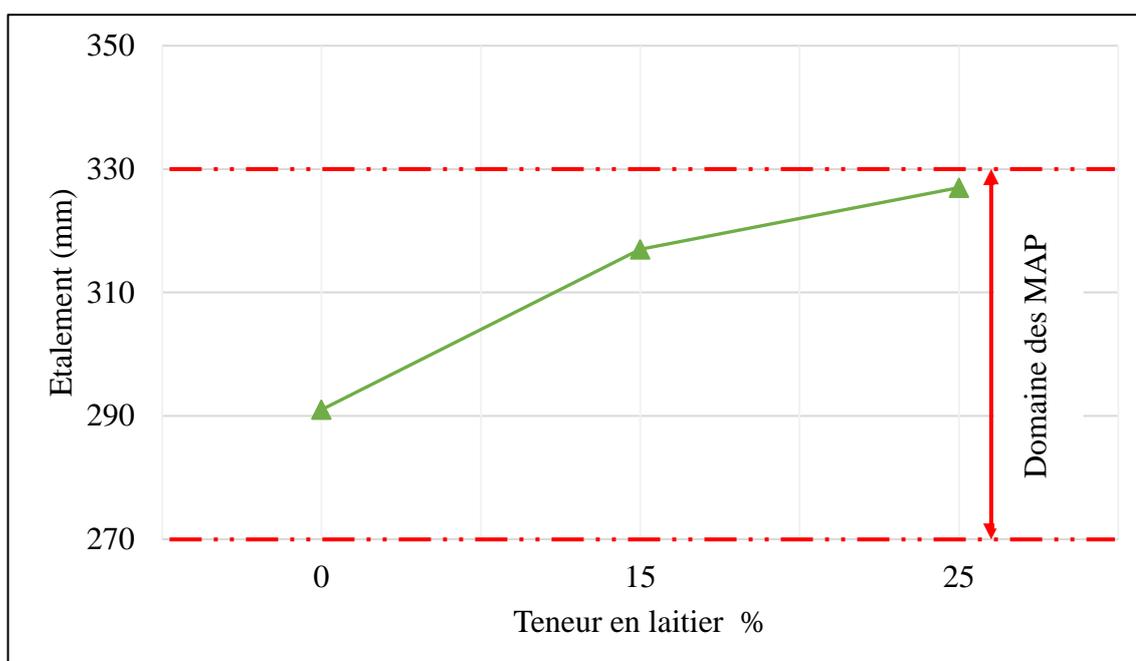


Figure 4.3: Effet de la teneur du laitier sur l'étalement des MAP.

#### 4.3.2 Temps d'écoulement ( $T_{vf}$ ) au V-Funnel

Nous avons réalisé l'essai de d'entonnoir en V-Funnel pour évaluer la fluidité et la stabilité du MAP. Les résultats du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de laitier sont indiqués sur le tableau 4.5 et la figure 4.4.

Tableau 4.5: Valeurs du temps d'écoulement au V-Funnel

| Laitier % | $T_{vf}$ (mm) | Temps d'écoulement $T_{vf}$ (sec) |
|-----------|---------------|-----------------------------------|
| 0         | 6.3           | 2-10 sec                          |
| 15        | 3.5           |                                   |
| 25        | 3             |                                   |

On note que les valeurs du temps d'écoulement sont de l'ordre de 6.3 à 3 sec et dépendent principalement du pourcentage de l'addition minérale utilisée. Tous les résultats obtenus dans le cadre de nos essais relatifs au temps d'écoulement sont inclus dans l'intervalle 2 à 10 secondes. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude réalisée par Domone et Jin [106].

En revanche, nous avons remarqué que l'incorporation de 15% de laitier en comparant avec le MAP de référence a conduit à une diminution remarquable du temps d'écoulement confirmant aussi les résultats de l'essai d'étalement au mini cône. Cependant, une diminution linéaire du temps d'écoulement est observée pour les dosages de substitution du ciment par le laitier qui passe de 0 à 25% à cause de la fluidité du mortier. D'après les observations d'Eva et al. [50] le laitier augmente le diamètre d'étalement et diminue le temps d'écoulement. De ce fait, les propriétés rhéologiques du laitier du haut fourneau ne représentent aucune contrainte d'écoulement.

Boukendakdji [95], a montré que l'augmentation du pourcentage du laitier dans le béton autoplaçant engendre une amélioration de l'ouvrabilité du point de vue étalement pour une substitution du ciment allant de 0% à 25%. Par contre, l'auteur a montré que l'incorporation du laitier dans le béton à raison de 15% donne le temps d'écoulement au V-Funnel le plus petit. D'autre part, Shi et al. [56] ont montré en étudiant l'influence du laitier sur l'ouvrabilité des mortiers que l'étalement de la galette augmente avec l'augmentation de la teneur en laitier (pour des taux de substitution allant jusqu'à 50% de laitier).

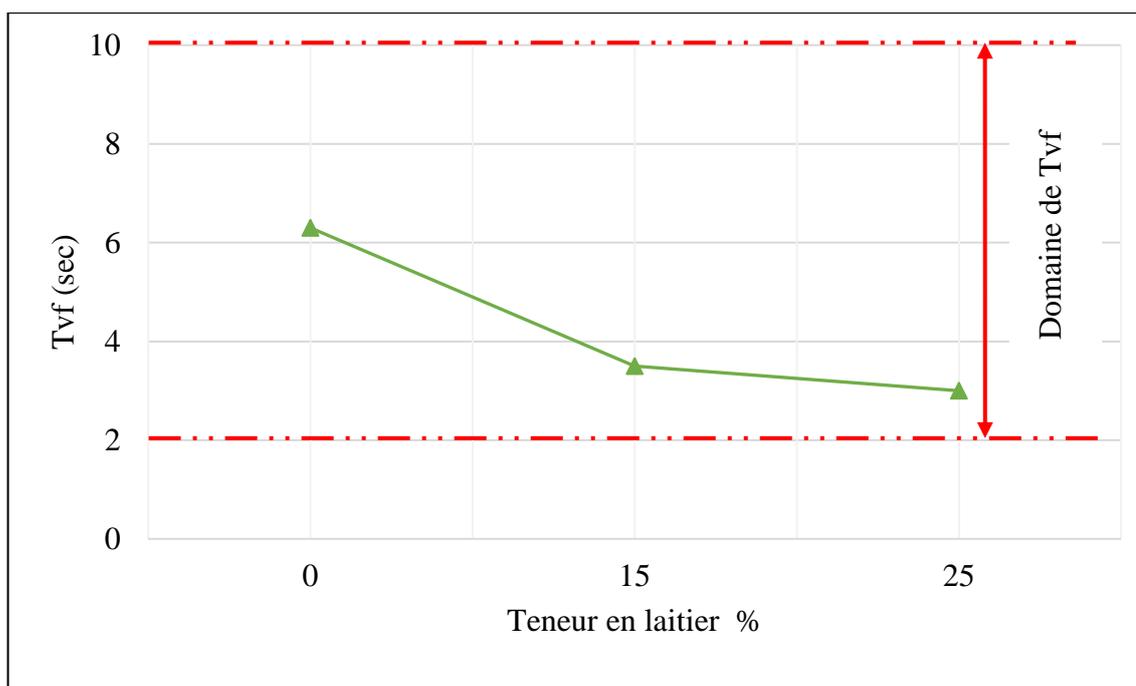


Figure 4.4: Effet de la teneur du laitier sur le temps d'écoulement des MAP.

#### 4.4. Rhéologie des mortiers

Après la détermination du dosage optimale et la confirmation de l'existence de la fluidité à travers les essais classiques (Mini cône et V-Funnel), nous avons réalisé l'essai au rhéomètre pour déterminer le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique du mortier à base du laitier avec un dosage optimale de SP=1.6%.

##### 4.4.1. Effet du laitier sur le seuil de cisaillement

Par définition, le seuil de cisaillement  $c$  est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule.

Le tableau 4.6 et la figure 4.5 illustre la variation du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier. On remarque une diminution du seuil de cisaillement par rapport au mortier de référence de 55% et 66% respectivement, pour les mortiers contenant des dosages de substitution du ciment par le laitier de 15% et 25%. Donc la baisse mesurée du seuil de cisaillement est due au pouvoir filler du laitier qui engendre un effet de roulement entre les grains de ciment, qui les rend plus mobiles. De plus, son hydratation libère une partie d'eau de gâchage qui va contribuer à la lubrification des grains.

Les valeurs mesurées sont similaires aux résultats trouvés par Adjoudj [33] qui a obtenu une courbe dont l'allure est presque linéaire concernant la diminution du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier dans un mortier adjuvanté.

Tableau 4.6: Valeur du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du laitier

| Laitier % | Seuil de cisaillement (Pa) |
|-----------|----------------------------|
| 0         | 20.61                      |
| 15        | 9.2                        |
| 25        | 7.02                       |

La figure 4.6 présente la corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement  $T_{VF}$ . On observe une forte corrélation entre l'augmentation de seuil de cisaillement en fonction d'augmentation du temps d'écoulement, dont le coefficient de corrélation  $R^2$  égale à 0.99. Ceci peut être expliqué par l'effet de l'augmentation de substitution du ciment qui diminue le temps d'écoulement et augmente la fluidité.

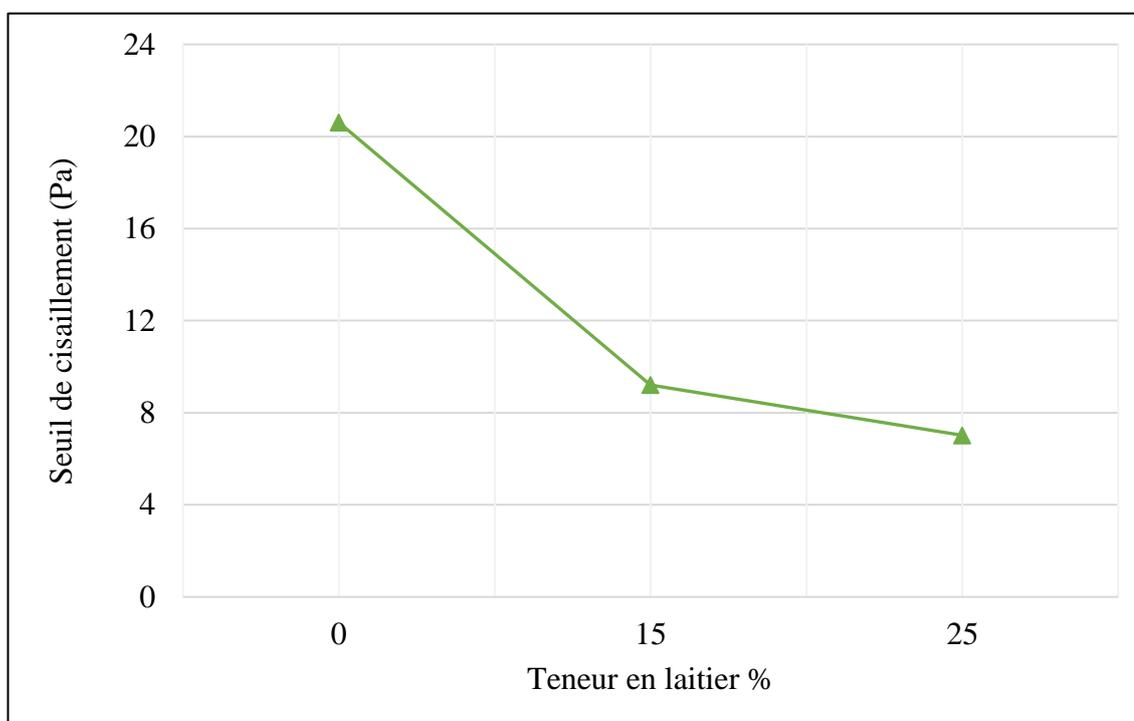


Figure 4.5: Effet de la teneur du laitier sur le seuil de cisaillement.

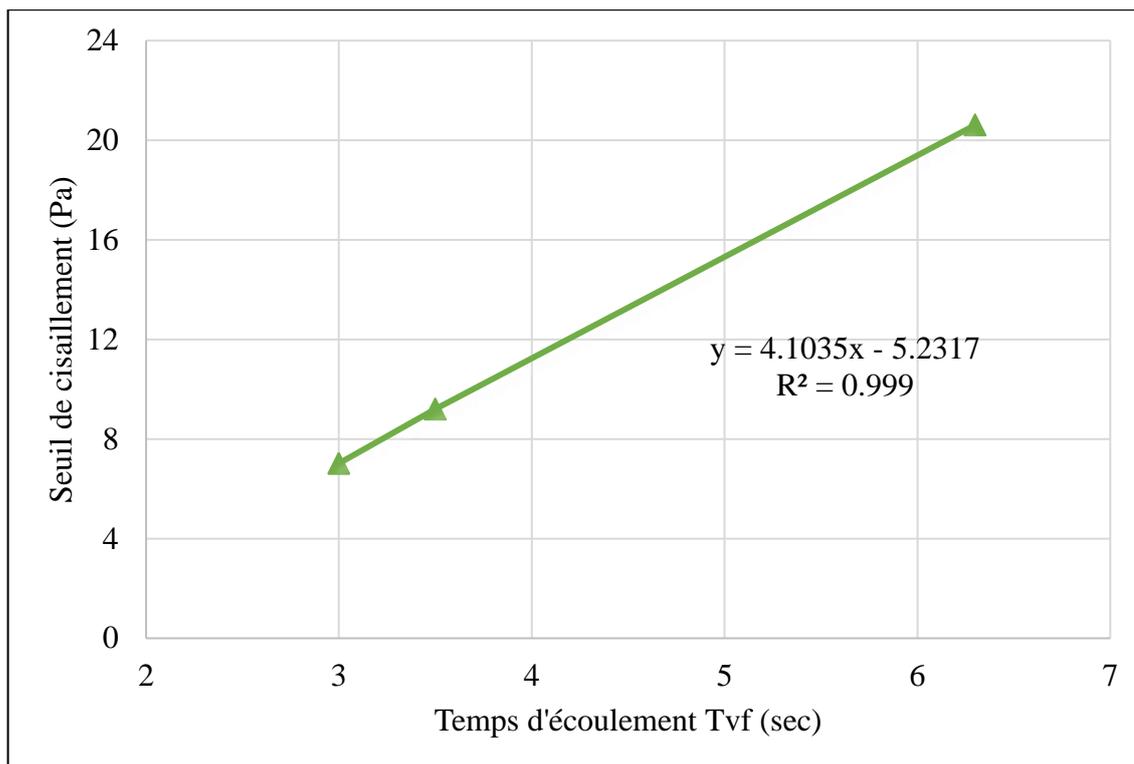


Figure 4.6: Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement  $T_{vf}$

#### 4.4.2. Effet du laitier sur la viscosité

La Viscosité est la dissipation d'énergie engendrée par les déplacements relatifs des particules les unes par rapport aux autres. Dans notre étude nous avons utilisé un superplastifiant à base de polycarboxylate qui est caractérisé par la création de charges négatives sur les grains du ciment provoquant la répulsion électrostatique donc l'augmentation des distances entre les particules. Cependant l'incorporation du laitier qui est connu par ses surfaces vitreuses lisses de ses grains à faible taux d'absorption permet le glissement inter granulaire dans le mortier, ce qui affaiblit bien la viscosité et le seuil de cisaillement.

La figure 4.8 et le tableau 4.7 présentent les variations de la viscosité en fonction de du taux de substitution du ciment. On observe une décroissance de la viscosité respectivement par rapport au mortier de référence de 6% et 32% correspondant à des dosages de substitution du ciment par le laitier de 15 et 25%.

Shi et al. [56] ont montré que la substitution du ciment par du laitier jusqu'à 50%, diminue la viscosité plastique du mortier avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à un taux de substitution de 20%, mais au-delà de cette valeur, la diminution est moins importante. De

même, Park et al. [117] affirment que la présence d'un superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Tableau 4.7: Valeur de la viscosité en fonction du taux de substitution du laitier

| Laitier % | Viscosité (Pa.s) |
|-----------|------------------|
| 0         | 6.2              |
| 15        | 5.8              |
| 25        | 4.21             |

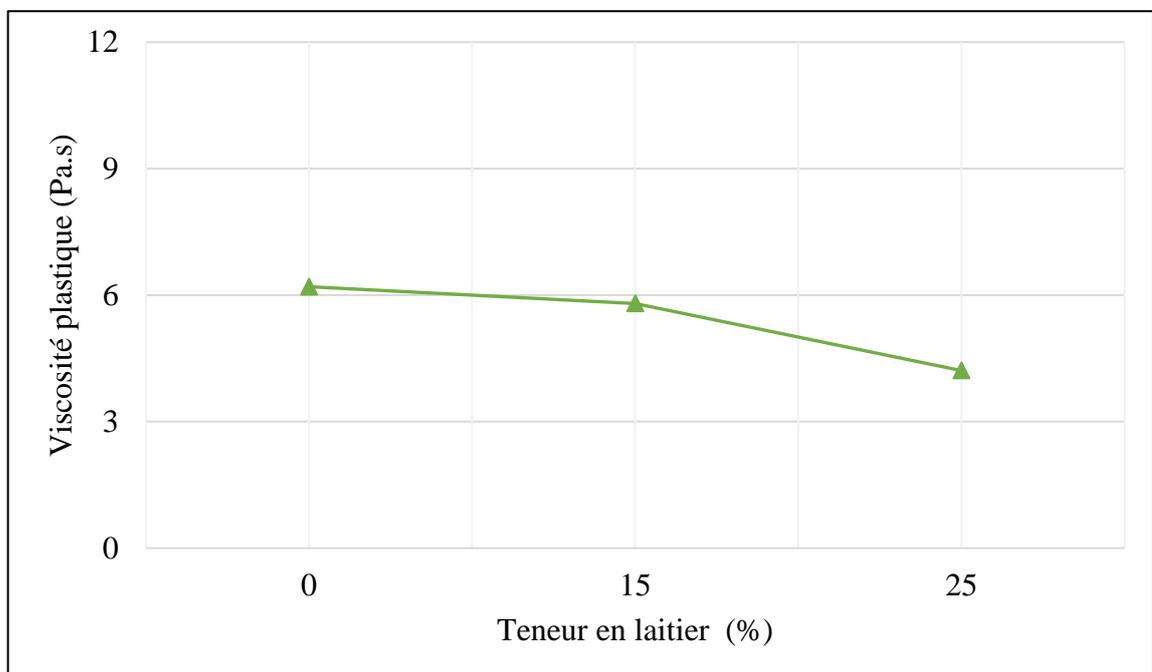


Figure 4.7: Effet de la teneur du laitier sur la viscosité plastique.

Sur la figure 4.8 nous constatons une dépendance de la viscosité vis-à-vis de temps d'écoulement. Cependant le coefficient de corrélation obtenu est 0.86 qui signifie une forte corrélation. Cela s'explique par le fait que le laitier substituant diminue la viscosité ce qui engendre une diminution du temps d'écoulement qui conduit à la dispersion de la suspension.

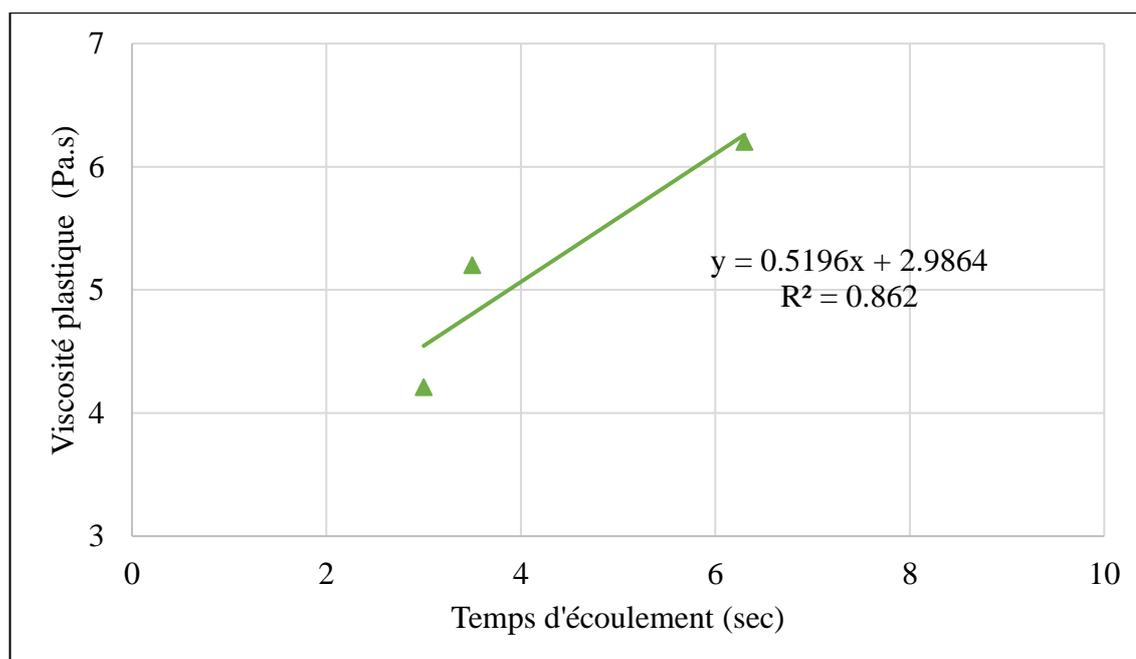


Figure 4.8: Corrélation entre la viscosité et le temps d'écoulement.

#### 4.5. Effet du laitier sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

Après l'optimisation du dosage en superplastifiant sur le mortier de référence, nous avons fixé les rapports  $S/M=0.5$ ,  $SP=1.6\%$  et  $E/L=0.40$ . La finesse du laitier a été maintenue constante pour une valeur de  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Trois compositions ont été élaboré en changeant le taux de substituant laitier de 0, 15 et 25%.

Le tableau 4.8 récapitule les trois compositions des BAP testés avec comme béton de référence le BAPR qui contient 0% de laitier.

Tableau 4.8: Composition des BAP testés ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

| Composition      | BAP R 0% L | BAP 15% L | BAP 25% L |
|------------------|------------|-----------|-----------|
| Ciment           | 490.89     | 419.15    | 371.01    |
| Laitier          | 0          | 69.34     | 115.94    |
| Gravier (3/8)    | 246.40     | 246.40    | 246.40    |
| Gravier (8/15)   | 492.79     | 492.79    | 492.79    |
| Sable            | 918.31     | 918.31    | 918.31    |
| Eau              | 200.92     | 200.218   | 199.72    |
| Superplastifiant | 7.85       | 7.81      | 7.79      |

Les essais de caractérisation de ces bétons ont été effectués selon les guides Européens du BAP [30,60], dont les valeurs limites sont données dans le tableau 4.9. Les résultats des essais sur l'étalement des différents bétons autoplaçants sont donnés dans le Tableau 4.10.

Tableau 4.9: Valeurs recommandés pour les essais du BAP [30]

| Essai                |                                     | Unité | Valeurs limites |
|----------------------|-------------------------------------|-------|-----------------|
|                      | Etalement S                         | mm    | 550 - 850       |
|                      | Temps d'Écoulement T <sub>50</sub>  | sec   | 2 - 5           |
| Essai V-Funnel       | Temps d'Écoulement                  | sec   | 6 - 12          |
| Essai de ségrégation | Laitance passant à travers le Tamis | %     | 0 - 15          |
|                      | Rapport des Hauteurs (H2/H1)        | /     | 0,8 - 1         |
|                      | T <sub>20</sub> et T <sub>40</sub>  | sec   | /               |

#### 4.5.1. Etalement et Temps T<sub>50</sub> au cône d'Abrams

Les résultats de l'essai au cône d'Abrams obtenus sont regroupés dans le tableau 4.10. La figure 4.9, présente la variation du diamètre d'étalement et du temps T<sub>50</sub> du béton en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier.

Tableau 4.10: Valeurs de l'étalement et le temps d'étalement T<sub>50</sub> au cône d'Abrams

| Laitier (%) | Etalement (mm) | Etalement Admissible (mm) | Temps d'étalement T <sub>50</sub> (sec) | T <sub>50</sub> Admissible (sec) |
|-------------|----------------|---------------------------|---|----------------------------------|
| 0           | 635            | 550-850                   | 2.78                                    | 2-5                              |
| 15          | 720            |                           | 2.5                                     |                                  |
| 25          | 780            |                           | 2.4                                     |                                  |

La courbe illustrée sur la figure 4.9 relative à l'effet de la teneur du laitier sur l'étalement, on remarque une augmentation de l'étalement de la galette du béton qui passe de 635 mm à 780 mm, soit une augmentation de 12 et 19% pour des taux de substitution respectifs de 15% et 25% du ciment par le laitier par rapport au béton de référence respectivement, tout en

restant dans la marge des valeurs correspondantes au BAP dans les limites exigées pour un BAP de 550 mm à 850 mm [30].

On constate également sur cette figure que l'incorporation du laitier améliore l'ouvrabilité du béton c'est-à-dire une meilleure fluidité et on note que le taux de 25% de laitier donne la plus grande valeur d'étalement sans ségrégation ni ressuage.

Les résultats du temps écoulé pour obtenir un étalement  $T_{50}$  en fonction du taux de substitution du ciment montrent que, l'évolution du temps  $T_{50}$  est linéaire avec l'augmentation du taux de substitution du ciment. Les valeurs de  $T_{50}$  obtenus sont conformes aux spécifications d'AFGC [30]. En effet, on remarque qu'un taux de substitutions de 25% donne la plus faible valeur de  $T_{50}$  (2.4 s) avec un étalement acceptable de 780 mm. Donc, on peut conclure que le taux de substitution de 25% de ciment par le laitier est considéré comme le dosage optimal qui permet de vérifier la capacité de remplissage à l'état libre en absence d'obstacles.

D'après Boukendakdji et al. [51], la substitution du ciment par le laitier d'un pourcentage de 0 à 25% donne des valeurs d'étalement acceptable variant de 630 à 787 mm et un temps d'étalement  $T_{50}$  variant de 0,66 et 1,25 seconde. Une bonne fluidité avec l'augmentation de teneur en laitier jusqu'à 15% a été observée. Par la suite, le temps d'écoulement  $T_{50}$  augmente, mais avec la présence du ressuage et de la ségrégation.

Aarre et Domone [118] ont trouvé un étalement entre 650 et 700 mm, et un temps  $T_{50}$  écoulement de 2-4 s, correspondant aux mélanges contenant entre 10-15% de laitier. Le dosage optimal du laitier qui donne un bon BAP sans présence de ségrégation est de 15%. Selon Lie et Ding [116], l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité.

D'autre part Wang et Lin [49], l'addition du laitier comme substituant de ciment améliore les propriétés à l'état frais. Les résultats montrent que l'étalement varie en fonction du taux de substitution de ciment Portland par le laitier de haut fourneau. Le dosage optimal est de 15% de laitier.

D'après Uysal et Yilmaz [119], les bétons qui contiennent des ajouts minéraux ont montré une meilleure maniabilité que les bétons sans ajout. L'utilisation de poudre de marbre et du calcaire dans le BAP vise à accroître la distribution des particules de la matrice de la poudre,

et par conséquent, de réduire les frottements entre particules. Une augmentation d'étalement a été observée jusqu'à 20% de laitier avec un optimum de 15%, mais plus la teneur en laitier augmente plus la ségrégation et de la viscosité augmente [51]. Guneyisi et al. [120] ont montré que l'étalement des BAP est lié principalement au rapport E/L, le type et la quantité des additions minérales utilisée dans la fabrication de béton.

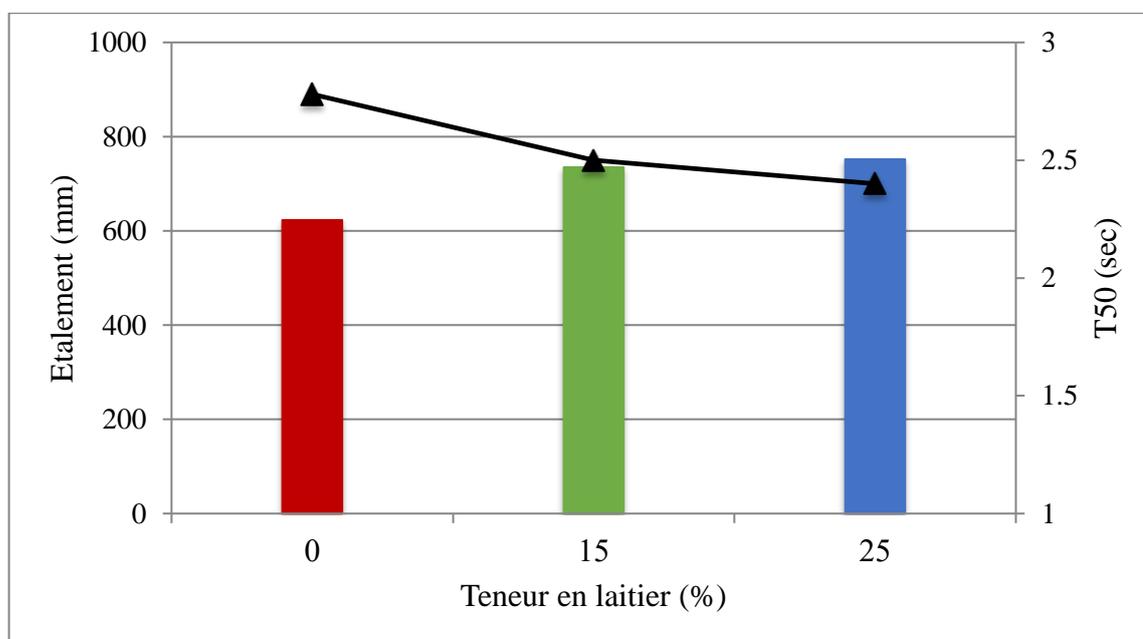


Figure 4.9: Etalement et le temps d'écoulement T50 en fonction de la teneur en laitier.

#### 4.5.2. Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V-Funnel

L'essai consiste à évaluer la mobilité du béton à passer à travers les zones confinées par la mesure du temps d'écoulement à travers l'entonnoir (en seconde). Cet essai caractérise la capacité de remplissage du mélange et il est relié à la viscosité de notre béton. Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de laitier sont indiqués sur le tableau 4.11 et la figure 4.10.

Tableau 4.11: Valeurs de temps d'écoulement au V-Funnel ( $T_{vf}$ )

| Laitier % | Temps d'écoulement $T_{vf}$ (sec) | $T_{vf}$ Admissible (sec) |
|-----------|-----------------------------------|---------------------------|
| 0         | 9.43                              | 6-12                      |
| 15        | 7.85                              |                           |
| 25        | 7.66                              |                           |

La figure 4.10 montre l'effet de la teneur en laitier sur le temps d'écoulement V-funnel. On remarque que toutes les formulations des BAP étudiés (0, 15 et 25% de laitier) vérifient les recommandations puisque  $T_{vf} < 12$  secondes [106]. On observe que le temps d'écoulement  $T_{vf}$  varie de 9.43 sec à 7.66 sec pour une augmentation du taux de substitution de 0 à 25 % respectivement. Cependant, le laitier a fait diminuer la cohésion des bétons autoplaçant et a conduit à une diminution du temps d'écoulement de 16 et 33% pour 15 et 25 % de laitier respectivement.

On note aussi que le temps d'écoulement  $T_{vf}$  diminue linéairement avec l'augmentation de la substitution du ciment par le laitier. L'optimum est obtenu à 25% de laitier avec une valeur de  $T_{V-Funnel}$  de 6.10 s. Plus le temps d'écoulement est court plus la fluidité est importante. On note que le temps d'écoulement dépend du type de formulation, du frottement entre les particules, la cohésion et la viscosité.

Gesoglu et al. [59], ont observé que l'utilisation de ciment ternaire (ciment Portland, fumée de silice et laitier) satisfait les recommandations d'EFNARC [60] en termes de temps d'écoulement de V-funnel. Le temps d'écoulement de V-Funnel optimum est obtenu pour 15% de laitier [51]. D'autres travaux de recherche [61], ont observé que l'incorporation de filler calcaire donne un temps d'écoulement  $T_{vf}$  inférieur à celui de mélanges de la poudre de marbre. Ce résultat peut être attribué à la finesse des fillers. D'autre part, l'inclusion de cendres volantes a eu le temps d'écoulement relativement le plus court.

D'après Eva et al. [50], les propriétés rhéologiques de laitier de haut fourneau ne représentent aucune résistance à l'écoulement car le laitier augmente le diamètre d'étalement et sert à diminuer le temps d'écoulement  $T_{vf}$ . Selon Dinakar et al. [64], le temps d'écoulement V-funnel présente également un comportement proportionnel à la teneur de l'addition minérale. Le dosage des cendres volantes jusqu'à 50% de substitution diminue  $T_{vf}$ . De nombreux chercheurs ont utilisé à la fois le T50 et à la fois V-funnel comme indicateurs de la viscosité des bétons très fluides.

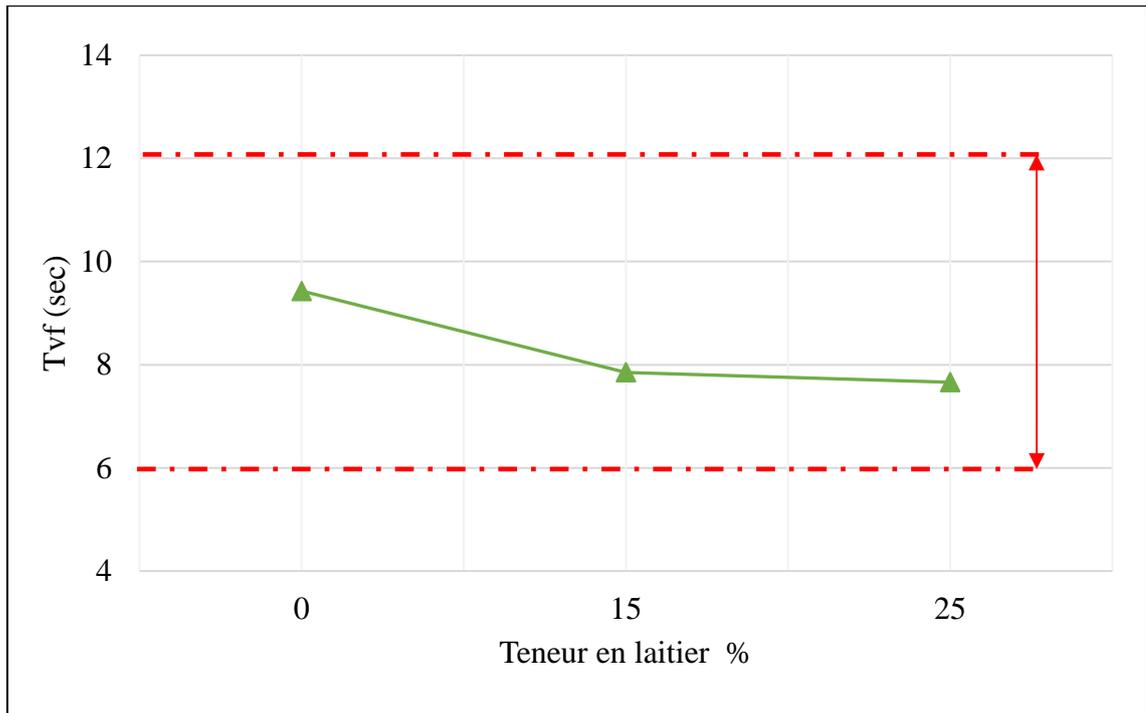


Figure 4.10:  $T_{V\text{-Funnel}}$  en fonction de la teneur en laitier.

#### 4.5.3 Mesures du rapport $H_2/H_1$ , les temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ de l'essai L-Box

L'essai de la boîte en L donne une bonne appréciation sur la capacité de remplissage et de passage. Les résultats du rapport  $H_2/H_1$ ,  $T_{20}$  et  $T_{40}$  obtenus en fonction du pourcentage du laitier sont présentés sur le tableau 4.12 et sur la figure 4.11 et 4.12.

Tableau 4.12: Valeurs du rapport  $H_2/H_1$ ,  $T_{20}$  et  $T_{40}$  de l'essai de L-Box

| Laitier (%) | Rapport $H_2/H_1$ | Valeurs limites | $T_{20}$ | $T_{40}$ | Valeurs limites |
|-------------|-------------------|-----------------|----------|----------|-----------------|
| 0           | 0.86              | 0.8-1           | 1.3      | 3.1      | 1.5-5           |
| 15          | 0.90              |                 | 0.8      | 1.6      |                 |
| 25          | 0.96              |                 | 0.7      | 1.2      |                 |

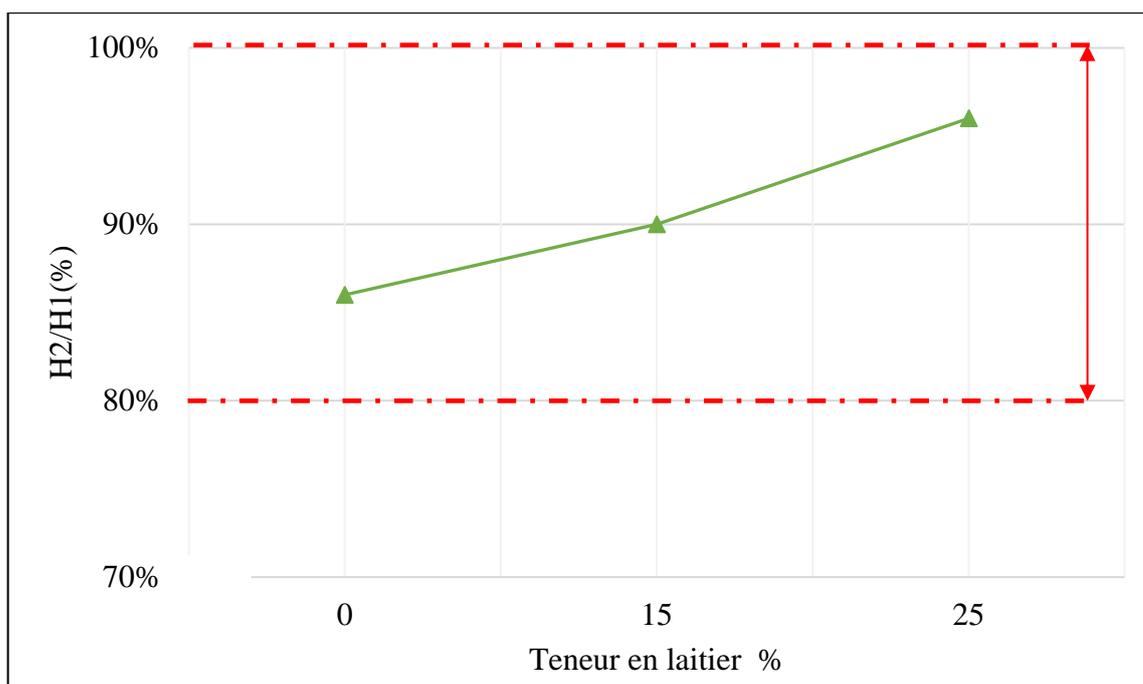


Figure 4.11: Rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> en fonction de la teneur en laitier.

Cet essai permet de tester la mobilité dans un milieu confiné et les résultats sont exprimés en fonction du taux de remplissage H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>. Un rapport (H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub>) est inférieur à 80% implique un risque de blocage. La raison de la faible valeur de H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> est due au mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage qui cause les problèmes de blocage ou de ségrégation [30].

On remarque que le rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> augmente de 6 et 10% pour une augmentation de pourcentage du laitier de 15 et 25 % respectivement. Selon cette figure, on note aussi que, plus le pourcentage de laitier augmente plus le rapport H<sub>2</sub>/H<sub>1</sub> tend vers 1, avec une valeur optimale à 25% de laitier.

Uysal et Yilmaz [119], ont observé que l'augmentation du pourcentage des additions minérales, tels que le calcaire, le marbre et le basalte dans le BAP, n'affecte pas le rapport de blocage. Cependant, on peut noter que chaque BAP étudié présente une capacité de remplissage et de passage suffisante.

Les propriétés rhéologiques du béton sont influencées considérablement par le type, la composition chimique, la densité, la finesse, la distribution granulométrique des ajouts minéraux, en raison de l'effet de remplissage, l'effet de la morphologie, l'effet de dispersion et l'effet d'adsorption [121]. En générale l'utilisation des ajouts minéraux comme la fumée de silice, cendres volantes et le laitier améliore d'une manière appréciable les propriétés

d'ouvrabilité du BAP [122]. Gesoglu et al. [59] ont conclu que l'incorporation des ajouts minéraux tel que la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier augmentent le rapport de L-Box ( $H_2/H_1$ ), ce qui montre l'amélioration de la capacité de remplissage et de passage des BAP.

Dinakar et al. [64] ont observé que le rapport  $H_2/H_1$  de la boîte en L présente des valeurs supérieures à 0,8 pour les BAP à base de cendres volantes avec un taux de substitution de 30 à 70% à l'exception du taux de 10% en raison de son comportement thixotrope. D'après Madandoust et Mousavi [123], la substitution partielle du ciment par le metakaolin diminue la capacité de passage des BAP dans le test de la boîte en L-box.

Liu [124] a montré la possibilité de la production d'un BAP avec un pourcentage de 80% de cendres volantes. La substitution ciment par les cendres volantes conduit à une réduction de la conservation de la consistance et de la capacité de passage lorsque la capacité de remplissage est maintenue constante. Uysal et al. [57] ont fabriqué un BAP à base des additions minérales (fumée de silice, poudre de marbre, laitier de haut fourneau, calcaire, poudre de basalte). Les meilleures performances d'ouvrabilité ont été obtenues avec l'addition de la fumée de silice.

Les temps  $T_{20}$  et  $T_{40}$  désignent le temps de passage du béton à la ligne de 20 cm et à celle de 40 cm respectivement. Ils permettent d'évaluer la vitesse d'écoulement et donnent ainsi une indication pour la capacité de remplissage. La figure 4.12 montre la variation de temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  en fonction de la teneur en laitier. On note que les valeurs des deux temps d'écoulement diminuent en fonction de la teneur en laitier et on observe une tendance linéaire en fonction de la substitution du ciment par le laitier. Par conséquent, on peut conclure qu'un taux de substitution de 25% de ciment par le laitier présente un dosage optimal. Les temps d'écoulements  $T_{20}$  et  $T_{40}$  sont vérifiés pour tous les BAP, où ils n'ont pas dépassé la limite inférieure (1.5 sec) et supérieure (3.5 sec) respectivement.

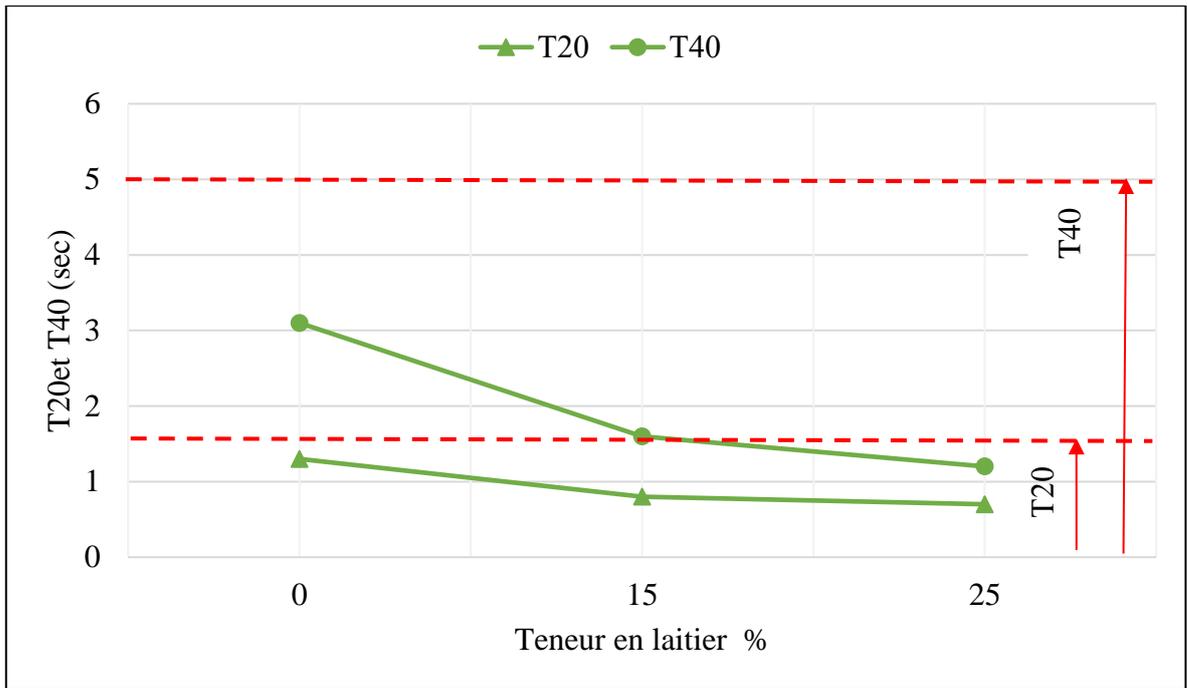


Figure 4.12: Temps d'écoulement  $T_{20}$  et  $T_{40}$  en fonction de la teneur en laitier.

#### 4.5.4. Résistance à la ségrégation par tamisage

Le tableau 4.13 et la figure 4.13 montrent les résultats des pourcentages de laitance passant à travers un tamis de 5 mm pour déterminer le degré de ségrégation statique des mélanges en fonction de la teneur en laitier.

la figure 4.8 montre que le pourcentage de la laitance augmente en fonction de l'augmentation de la teneur de laitier et toutes les compositions ont une stabilité satisfaisante ( $0\% \leq \pi \leq 15\%$ ). Le laitier de haut fourneau favorise l'instabilité du béton et provoque une tendance à la ségrégation statique. Les valeurs de pourcentage de laitance trouvées présentent une stabilité satisfaisante. En effet les mesures de stabilité au tamis sont inférieures aux seuils de 15% imposée par la norme l'EFNARC [60].

D'après Boukendakdji et al. [51], une proportion de 5-15% de l'échantillon passant au tamis offre une résistance optimale à la ségrégation. Dans notre cas, la résistance à la ségrégation est satisfaite avec 15% de laitier. L'addition de 20% et 25% donne du ressuage et de la ségrégation.

Uysal [125] a montré que tous les mélanges à base des additions minérales ont une bonne viscosité et une bonne résistance à la ségrégation. La ségrégation des tamis de 80% de cendres volantes présente le plus faible pourcentage de laitance [126].

Tableau 4.13: Valeurs de la laitance en fonction de la teneur en laitier

| Laitier (%) | Pourcentage de laitance (%) | Laitance admissible( %) |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0           | 5.5                         | 0-15                    |
| 15          | 7.9                         |                         |
| 25          | 10.95                       |                         |

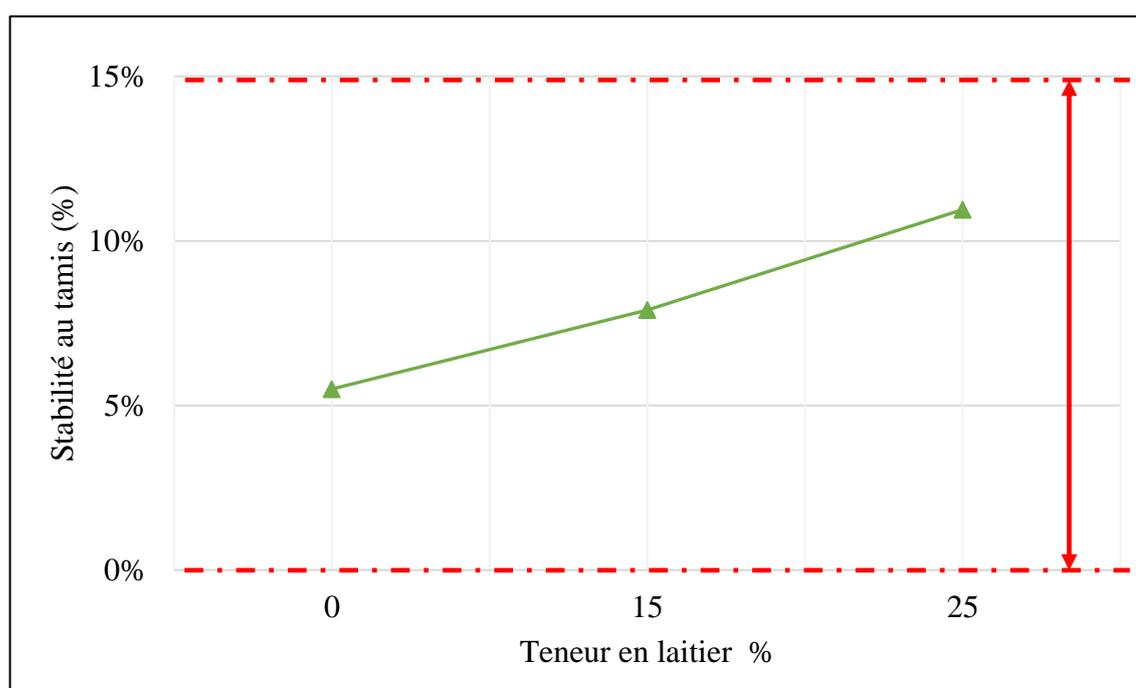


Figure 4.13: Résistance à la ségrégation par tamisage en fonction de la teneur en laitier.

#### 4.6. Effet du laitier sur la rhéologie des BAP

##### 4.6.1. Effet du laitier sur le seuil de cisaillement

Par définition, le seuil de cisaillement c'est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule. Le tableau 4.14 et la figure 4.14 illustrent la variation du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment des différentes compositions des BAP.

Tableau 4.14: Valeur du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment

| Laitier % | Seuil de cisaillement (Pa) |
|-----------|----------------------------|
| 0         | 15.09                      |
| 15        | 10.37                      |
| 25        | 7.74                       |

La figure 4.14 montre que l'incorporation du laitier améliore l'ouvrabilité du BAP et conduit à la diminution du seuil de cisaillement. Le seuil de cisaillement diminue de 15.09 à 10.37 et 7.74 Pa pour un taux de substitution du ciment par le laitier de 0, 15 et 25%, respectivement.

Les valeurs mesurées sont similaires aux résultats trouvés par Adjoudj [33] qui a obtenu une courbe dont l'allure est presque linéaire pour la variation du seuil de cisaillement en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier dans un mortier adjuvanté. Boukendakdji et al. [51] ont substitué du ciment par le laitier et ont rapporté une amélioration de la maniabilité avec l'utilisation de 20% de laitier de hauts fourneaux.

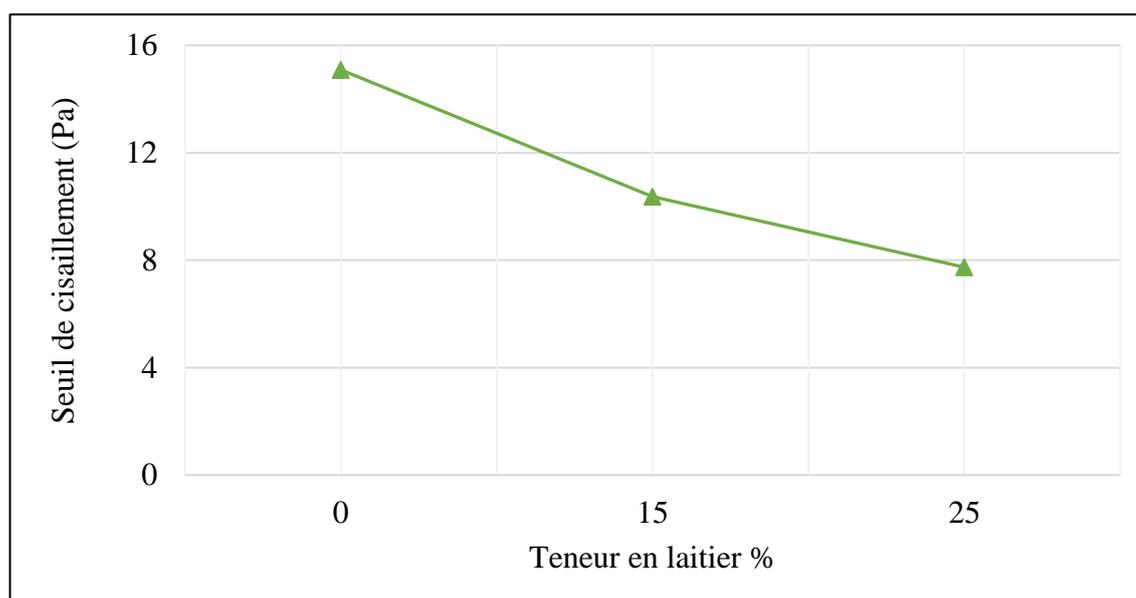


Figure 4.14: Effet du laitier sur le seuil de cisaillement.

La figure 4.15 illustre la corrélation entre le seuil de cisaillement en fonction du temps d'écoulement. Le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0.876, signifiant une forte relation entre le temps d'écoulement en V-Funnel et le seuil de cisaillement des BAP substitués par le laitier.

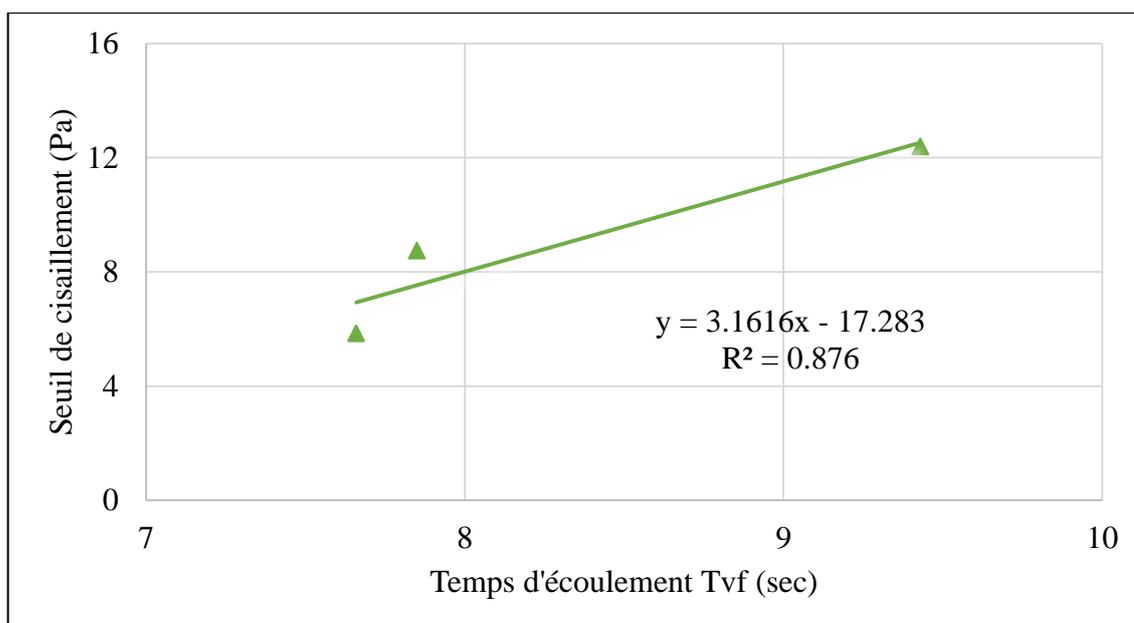


Figure 4.15: Corrélation entre le seuil de cisaillement et le temps d'écoulement  $T_{vf}$ .

#### 4.6.2. Effet du laitier sur la viscosité plastique

Les résultats de la viscosité plastique en fonction du taux de substitution du ciment des différents mélanges de BAP étudiés sont illustrés dans la figure 4.16 et le tableau 4.15.

On peut voir clairement que la viscosité plastique diminue avec l'augmentation du taux de substitution du ciment. Elle diminue de 12.4 Pa.s pour un BAP de référence à 8.75 et 6.81 Pa.s pour 15 et 25% du laitier respectivement. On observe aussi une décroissance de la viscosité respectivement de 29% et 45% correspondant à des dosages de substitution du ciment par le laitier de 15% et 25% respectivement par rapport au béton autoplaçant de référence. Ceci peut être expliqué par les surfaces vitreuses lisses des grains à faible taux d'absorption du laitier qui permettent le glissement inter granulaire dans le béton, entraînant la diminution de la viscosité et du seuil de cisaillement.

Ces résultats ont été confirmés par les travaux de Gesoglu et al. [59] ou contrairement à la fumée de silice, l'incorporation des cendres volantes et du laitier dans les mélanges de béton a diminué la viscosité. Shi et al. [56] ont montré que la substitution du ciment par du laitier jusqu'à 50%, diminue la viscosité plastique du mortier avec l'augmentation de la teneur en laitier jusqu'à un taux de substitution de 20%, mais au-delà de cette valeur, la diminution est moins importante. De même, Park et al. [117] affirment que la présence d'un superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. En revanche, la substitution du

ciment avec le laitier de haut fourneau peut réduire à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité de la pâte de ciment.

Selon Huang et al. [127] ont rapporté que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des BAP diminue significativement avec l'augmentation de superplastifiant, qui est due probablement aux caractéristiques de la composition du BAP de la haute teneur en poudre et le pourcentage de sable élevé.

Tableau 4.15: Valeur de la viscosité plastique en fonction du taux de substitution du ciment

| Laitier % | Viscosité plastique (Pa.s) |
|-----------|----------------------------|
| 0         | 12.4                       |
| 15        | 8.75                       |
| 25        | 6.81                       |



Figure 4.16: Effet du laitier sur la viscosité plastique.

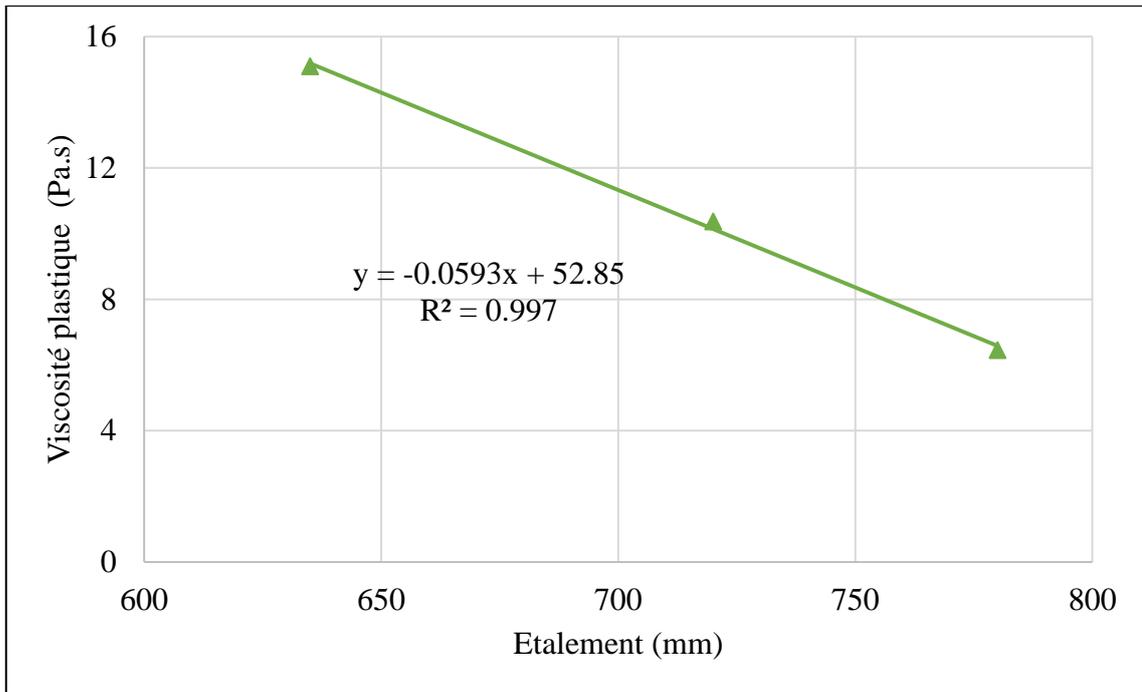


Figure 4.17: Corrélation entre la viscosité et l'étalement des BAP.

#### 4.7. Effet du climat chaud sur la résistance de compression

Les résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçant en fonction de la teneur de laitier et la durée de cure humide (0, 3, 7 et 28 jours) sont récapitulés dans le tableau 4.16 et illustrés sur les figures 4.18 et 4.19.

Tableau 4.16: Résistance à la compression à 28 et 90 jours des différents bétons étudiés

| Mode de cure | Résistance à la compression (MPa) |             |             |             |             |             |
|--------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|              | BAP 0 %                           |             | BAP 15 %    |             | BAP 25 %    |             |
|              | Rc28j (MPa)                       | Rc90j (MPa) | Rc28j (MPa) | Rc90j (MPa) | Rc28j (MPa) | Rc90j (MPa) |
| 0 jour       | 34.13                             | 36.68       | 34.73       | 37.13       | 33.84       | 40.39       |
| 3 jours      | 35.93                             | 39.65       | 34.36       | 39.56       | 34.25       | 43.97       |
| 7 jours      | 37.65                             | 44.14       | 36.2        | 44.13       | 36.85       | 48.67       |
| 28 jours     | 40.57                             | 47.76       | 39.15       | 49.93       | 40.22       | 55.03       |

Les figures 4.18 et 4.19 montrent l'évolution de la résistance à la compression des BAP à base de laitier en fonction de la durée de cure humide ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{RH}=100\%$ ). Les essais d'écrasement ont été effectués à 28 et 90 jours de durcissement. Les durées de cures initiales sont 0, 3, 7, et 28 jours, suivi d'une conservation à l'air libre sur la toiture de laboratoire en période d'été. Ces évolutions de résistance à la compression sont comparées à celle des BAP de référence sans cure initiale (0 jour).

L'effet de la durée de cure humide et de l'ajout du laitier est clairement montré par ces résultats. Toutes les durées de cures ont un effet bénéfique sur la résistance à la compression du béton conservé dans un climat chaud réel. Dans le cas des BAP incorporant le laitier, la hausse de la température de durcissement tend à induire une baisse de résistance à 28 et 90 jours, quels que soient la durée de cure. On peut constater que la résistance à la compression à 28 jours et la résistance à 90 jours dépendent fortement de la durée de cure. Une des principales observations est que, plus la durée de cure dans l'eau est courte plus les résistances sont faibles et progressent moins dans le temps.

La résistance obtenue à 0 jour de cure (qui a subi aucune cure) ne représente que 84% de la valeur obtenue au même âge mais après 28 jours de cure c.-à-d. un gain de résistance de 16% et on remarque que plus on augmente la durée de cure plus la résistance augmente. On constate aussi que l'allongement de la durée de cure est surtout efficace pour les premiers jours de cure. Pour 7 jours de cure, un gain de résistance de 9% a été obtenu, alors que pour une durée de cure de 28 jours, un gain de 16% est obtenu. En revanche, la prolongation de la durée de cure de 28 jours semble peu envisageable en pratique et donc un optimum pourrait être choisit à 7 jours. La résistance à la compression après 0,3 et 7 jours de cure respectivement, représente 84, 89 et 93% par rapport à celle conservée dans l'eau pendant 28 jours de cure pour un BAP de référence.

On peut observer que l'augmentation de la substitution du ciment par le laitier de 15 à 25% a conduit à une résistance à la compression à 28 jours totalement similaires à celle du BAP sans laitier, quelle que soit la durée de cure. Ceci est dû probablement à l'effet pouzzolanique du laitier qui se développe moins rapidement aux jeunes âges (Figure 4.18).

La résistance à la compression à 90 jours nous renseigne sur le niveau de résistance de béton à long terme et permet d'évaluer le gain de résistance après l'arrêt de cure humide. Les

valeurs de résistance en compression à 90 jours varient entre 36.60 à 43.60, 37.10 à 49.90 et 40.4 à 55.0 MPa dont la teneur de laitier est 0, 15 et 25% respectivement.

La résistance à long terme (90 jours) augmente avec la durée de cure, mais cette augmentation est d'autant plus marquée que la substitution de ciment par le laitier est plus élevée. Ceci est dû à l'hydratation du laitier qui s'effectue à long terme lentement mais régulièrement. Une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier a été observée à 90 jours. En effet, à 90 jours, cette augmentation est de 1.5, 3.6, 5 et 13% pour les BAP avec 15% du laitier et 8, 10, 9 et 9% pour les BAP avec 25% du laitier respectivement.

Heba [82] a observé que le BAP avec 10% de cendres volantes et 10% de fumée de silice comme substituant donne la résistance du béton à la compression la plus élevée. La plus grande valeur de résistance à la compression est obtenue avec des échantillons durcis dans l'eau pendant 28 jours et la valeur la plus faible est obtenue pour les échantillons conservés à l'air libre. Les BAP avec 15% de fumée de silice donnent des valeurs élevées de résistance à la compression que celles contenant 30% de cendres volantes et les échantillons durcis dans l'eau pendant 28 jours donnent les plus grandes valeurs de résistance à la compression. D'après Turk et al. [70], les BAP avec une durée de cure humide de 7 jours et dans des conditions de cure FR ( $T=28^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=85\%$ ) présentent un gain de résistance à la compression très élevé. Amrane et Kenai [128] ont rapporté que les résistances des bétons aux laitiers aux premiers âges sont faibles. Pour un béton à 40% de laitier, elles représentent à 3 et à 7 jours 71% et 78% de la résistance du béton témoin. A 28 jours et plus, les résistances deviennent assez comparables sinon meilleures à celles du béton témoin. La résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais se développe assez bien à long terme pour des taux de substitution n'excédant pas les 30% [129].

Boukendakdji [95] a observé qu'une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité de laitier dans le mélange est observée à tous les âges. En effet, à 28 jours, cette diminution équivaut à 7,4%, 11%, 23,9% et 28,9% respectivement pour des taux de substitution du ciment par du laitier de 10%, 15%, 20% et 25%. Néanmoins, la diminution de la résistance à la compression est moins importante dans le cas des âges avancés (56 et 90 jours après malaxage). La diminution de résistance à la compression pour 15% de laitier est de 7,7 MPa à 28 jours, 4,3 MPa à 56 jours et 3,9 MPa à 90 jours.

Austin et al [130] ont démontré que l'utilisation du laitier avec 50 % dans un climat chaud typique des régions arides de l'Algérie peut produire un béton de haute qualité constamment et significativement mieux que le béton sans laitier en termes de résistance, de la perméabilité et de l'absorption, à condition qu'une cure humide est appliquée dans les 7 premiers jours.

Selon Wang et lin [49], les résistances à la compression des bétons aux laitier à 7 jours avec un rapport E/C =0.37, sont similaires (34,35 MPa et 35,74 MPa) lorsque la substitution du ciment est de 0 et 15 % du poids du ciment respectivement. Cependant, à l'âge de 28 jours, 56 jours et 91 jours, la résistance à la compression avec 15 % du laitier présente la valeur la plus élevée par rapport au béton du contrôle (13%) et 30% de laitier présente la résistance à la compression la plus faible.

Par contre Nasir et al. [131] ont noté que la résistance à la compression augmente avec une augmentation de la température de coulage du béton pendant les premiers les 7 premiers jours. Cependant, à un âge plus avancé de 28 à 180 jours, la résistance à la compression a augmenté jusqu'à environ 32-38°C tandis qu'une baisse a été notée avec l'augmentation supplémentaire de la température du coulage.

Le règlement américain ACI 305 [132] limite la température du coulage à 35 °, Cette limite pourrait être révisée à 32°C. Cependant, pour les ciments avec ajouts (cendres volantes, laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle) la température de coulage admissible pourrait être augmenté à 38°C. La température de coulage accrue conduit également à une économie dans le coût du béton en raison de l'élimination de la glace qui est normalement utilisé pour abaisser la température du béton frais et encouragera l'industrie d'utiliser les ajouts minéraux par temps chaud [131]. D'autres chercheurs [133] ont montré que quel que soit l'âge du béton l'augmentation de taux de substitution du ciment par le laitier au-delà de 25% diminue la résistance à la compression. Les bétons avec 25% du laitier présente la résistance la plus élevée par rapport à la résistance caractéristique. La résistance à la compression avec 25% de laitier est supérieure à celle du BAP témoin de 1,4% et de 0,13% à l'âge de 7 et 28 jours respectivement.

L'addition de 25% de taux de laitier dans les BAP a conduit à une résistance à la compression plus élevée en raison d'un raffinement des pores avec une zone interfaciale plus dense dans le mélange du BAP.

Selon Dadsetan et Bai [134], les BAP confectionné avec du laitier et un rapport E/L =0.4 ont montré une importante croissance de la résistance à la compression à tous les âges avec l'augmentation du taux de laitier. A sept jours, tous les mélanges du BAP substitués avec du laitier ont montré une résistance à la compression plus faible par rapport aux BAP témoin. Cependant, 30% de remplacement du laitier a montré une meilleure performance après 28 jours. Tous les mélanges avec le rapport E/L=0,45 atteint une résistance à la compression supérieure à celle du BAP témoin.

Valcuende et al. [135] ont montré que la substitution du sable par du laitier conduit à des mélanges ayant un volume poreux total plus élevé et une structure poreuse légèrement fine, avec un diamètre de pores plus petits. A jeune âge (7jours) les résultats de résistance à la compression sont comparables à celles du béton de contrôle et un taux très élevé du laitier conduit à des résistances à la compression plus faible. Ceci est dû au volume de pâte élevée et la porosité élevée du mélange. Selon Ibrahim et al. [136], pour chaque taux de substitution, les échantillons qui ont subi une cure humide de 56 jours dans l'eau ont enregistré une résistance à la compression supérieure à celles obtenus à 3 jours de cure.

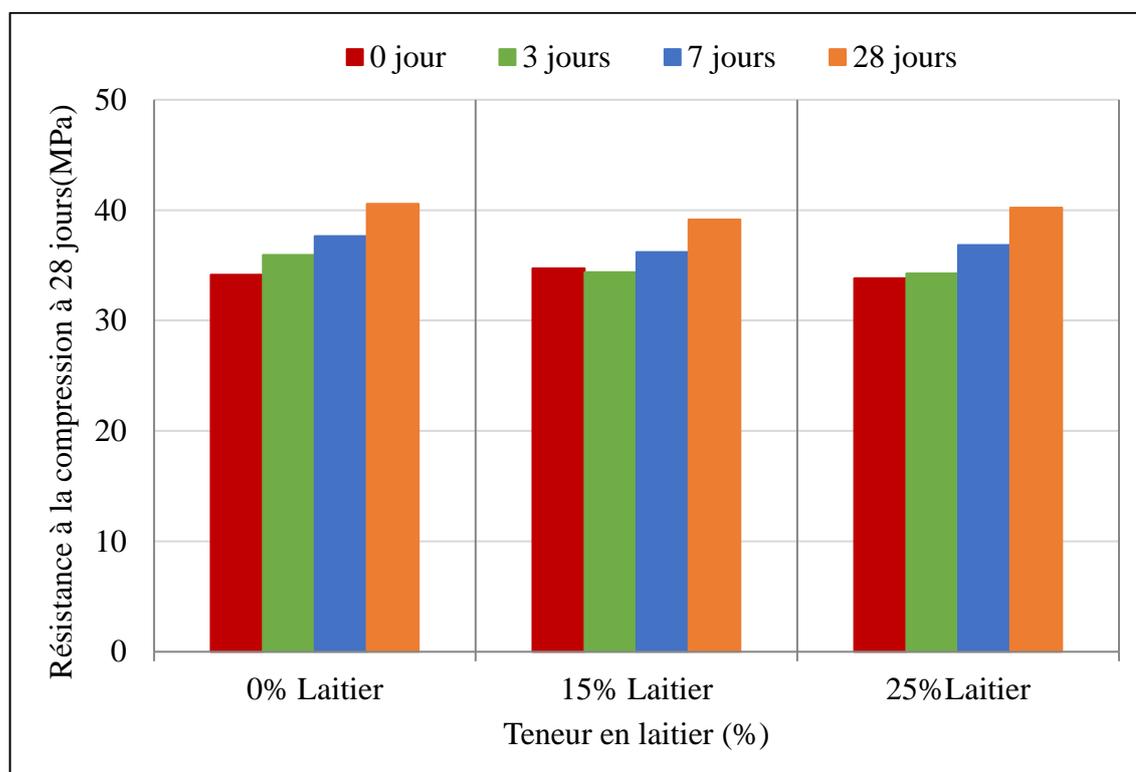


Figure 4.18: Effet de la durée de cure sur la résistance à la compression à 28 jours.

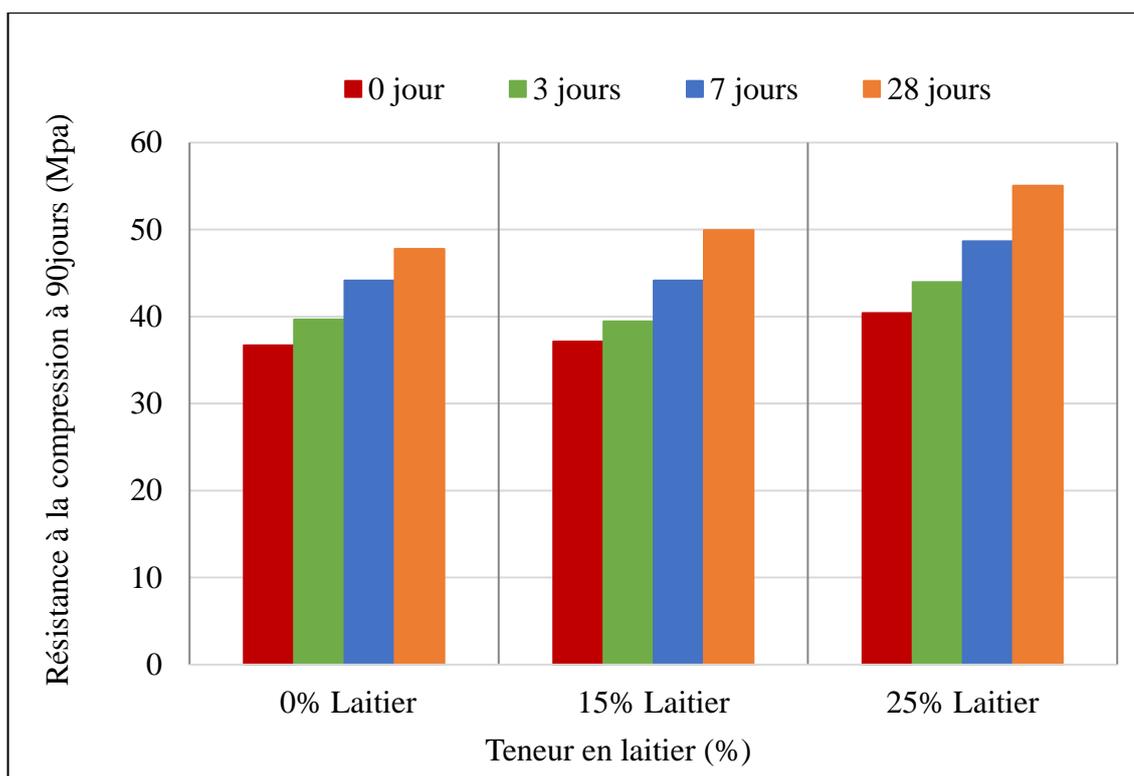


Figure 4.19: Effet de la durée de cure sur la résistance à la compression à 90 jours.

#### 4.7. Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre concernant l'état frais et les propriétés mécaniques nous permettent de retenir un certain nombre de points :

- Les essais rhéologiques nous ont permis de déterminer le dosage optimal de taux de substitution de laitier par le ciment.
- La substitution partielle du ciment par le laitier d'El-Hadjar a modifié les paramètres à l'état frais et durcis du BAP par rapport au BAP de référence.
- L'élévation de la température du béton favorise la baisse de résistance à la compression à toutes les échéances (0j, 3j, 7j et 28j) pour tous les mélanges, quels que soient la durée de cure.
- L'augmentation de la substitution du ciment par le laitier de 15 et 25% par le ciment conduit à une résistance à 28 jours qui se rapproche de celle du béton sans ajout. Néanmoins, à 90 jours, une légère augmentation est observée.

## CHAPITRE V :

### RÉSULTATS ET DISCUSSIONS : DURABILITE DES BAP

#### 5.1. Généralité

La durabilité d'un l'ouvrage est une caractéristique très importante est défini comme la capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu et de résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant. L'étude expérimentale a été consacré sur l'effet d'incorporation du laitier sur la durabilité du BAP. L'absorption capillaire, la perméabilité à l'eau, la porosité et la perméabilité aux ions chlore ont été étudiés en fonction du taux de laitier. Deux modes de conservations des éprouvettes différentes ont été étudiés, soit un environnement standard  $T=20^{\circ}$ ,  $HR=100\%$  (conservation normalisée des éprouvettes de contrôle), soit dans un climat chaud qui varie de (25 à  $45^{\circ}\text{C}$ ) à l'extérieur du laboratoire durant l'été dans la région de Blida.

#### 5.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire est due à l'action des capillaires. La mesure de la sorptivité est un moyen qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. L'absorption capillaire des gros pores a été calculée à 6h. Les résultats expérimentaux de l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité (I) et la sportivité (S) en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure sont illustrés sur les figures 5.1 à 5.3. Le tableau 5.1 récapitule les résultats de la quantité d'eau absorbée (I) et la sorptivité S, calculée par régression linéaire de l'ensemble des mesures (Équation 3.8).

Les figures 5.1 à 5.3 montrent que l'absorption capillaire diminue avec la durée de cure humide. On peut constater que l'absorption capillaire à 28 jours de cure présente le plus faible coefficient d'absorption. Plus la durée de cure dans l'eau est longue, plus le coefficient d'absorption d'eau est faible. L'absorption capillaire diminue avec la durée de cure humide. On peut constater aussi que l'absorption capillaire à 28 jours de cure présente le plus faible coefficient d'absorption. Les coefficients d'absorption obtenus après 28 jours de cure représentent une diminution de 42, 50 et 55% de ceux obtenues à 0 jour de cure pour les BAP 0, 15 et 25%, respectivement. On remarque aussi que l'allongement de la durée de cure

est surtout efficace pour les premiers jours de cure. Pour 3 jours de cure, on a une diminution de 8, 7 et 11% du coefficient d'absorption pour 0, 15 et 25% de laitier respectivement.

L'incorporation du laitier a engendré aussi une diminution du coefficient d'absorption d'eau pour les BAP de 15 et 25% de laitier. On constate que l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier de 15 à 25% du poids de ciment a conduit à une diminution du coefficient d'absorption de 12, 11, 1 et 25% et 24,26,13 et 41 % pour une durée de cure de 0, 3,7 et 28 jours respectivement. Une des principales observations que le BAP avec 25% du laitier après 28 jours de cure présente le coefficient d'absorption capillaire le plus faible par rapport au BAP de référence et représente 59% par rapport au BAP de référence. L'absorption capillaire dépend de l'état d'hydratation atteint après un certain temps de conservation dans l'eau.

Hadj Sadok [137] a trouvé que l'absorption d'eau par capillarité à 28 jours est comparable pour tous les bétons étudiés. A 90 jours, une légère diminution de l'absorption d'eau pour les bétons au laitier est enregistrée, notamment pour un béton avec 50% du laitier qui présente une valeur du coefficient d'absorption de  $3,05 \text{ kg/mm}^2/\text{h}^{1/2}$  comparée à  $3,23 \text{ kg/mm}^2/\text{h}^{1/2}$  pour le béton avec 0% du laitier. Alexander et al. [138] ont trouvé que l'incorporation de 50% de laitier dans un béton avec un rapport E/L de 0,49, diminue le coefficient d'absorption de 9%. Ce résultat est confirmé par d'autres recherches montrant une diminution de l'absorption d'eau par capillarité pour les bétons au laitier, particulièrement pour des taux de laitier supérieurs à 50% [139]. Cette diminution reflète une structure de pores plus raffinée et une diminution de la porosité capillaire, due à la formation de CSH secondaire issu de l'hydratation du laitier [140]. Kockala et Turker [141] ont trouvé que les coefficients de capillarité sont très élevés dans les bétons conservés dans un environnement naturel. Tasdemir et al. [22] ont montré que les additions minérales (les cendres volantes (FA), la poudre de grés (PS), la poudre de calcaire (LP) et la fumée de silice (SF)) sont bénéfiques pour l'augmentation de la résistance et la réduction de l'absorption capillaire. Turk et al. [70] ont indiqué qu'une bonne cure et un mélange pouzzolanique (fumée de silice ou cendres volantes) comme substitution au ciment améliorent la résistivité des BAP vis-à-vis de l'absorption d'eau de manière significative. Turkmen et Kantarci [83] ont montré que le changement des valeurs des coefficients de capillarité dépend de la durée et des conditions de cure ainsi que du pourcentage des granulats légers type EPA (expanded perlite aggregate).

Tableau 5.1: Résultats de l'absorption capillaire et sorptivité après 6h.

| Cure     |  | BAP0% laitier | BAP15% laitier | BAP25% laitier |
|----------|--|---------------|----------------|----------------|
| 0 jour   | I (mm)                                     | 2.50          | 2.20           | 1.91           |
|          | S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup> | 16            | 15             | 12             |
| 3 Jours  | I (mm)                                     | 2.30          | 2.05           | 1.70           |
|          | S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup> | 15            | 14             | 11             |
| 7 Jours  | I(mm)                                      | 1.85          | 1.85           | 1.60           |
|          | S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup> | 12            | 12             | 11             |
| 28 Jours | I (mm)                                     | 1.45          | 1.09           | 0.86           |
|          | S (mm/h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-3</sup> | 10            | 7              | 5              |

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux et décrire le mouvement de l'eau qui est dû à l'action des capillaires. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité [45].

Les coefficients de sorptivité (S) qui sont représentées dans la figure 5.4 montrent que le coefficient de sorptivité diminue avec l'augmentation de la durée de cure. Les éprouvettes conservées à l'air libre présentent une augmentation du coefficient de sorptivité de 38, 53 et 58% pour un taux de substitution de 0,15 et 25% du laitier respectivement. L'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier conduit à une diminution de coefficient de sorptivité de 30 et 50% pour un BAP de 15 et 25% du laitier respectivement par rapport au BAP de référence après 28 jours de cure.

Une bonne corrélation a été observée entre la sorptivité et les valeurs de la résistance à la compression dont les coefficients de corrélations sont 0.988, 0.966 et 0.810 pour un taux de substitution de 0,15 et 25% du laitier respectivement. La résistance à la compression des BAP augmente avec l'hydratation et la sorptivité diminue significativement indiquant une microstructure plus dense.

Gesoglu et al. [61] ont rapporté que le coefficient de sorptivité le plus élevé a été observé au béton témoin. L'incorporation de la poudre de marbre et filler de calcaire a un effet remarquable sur la diminution du coefficient de sorptivité.

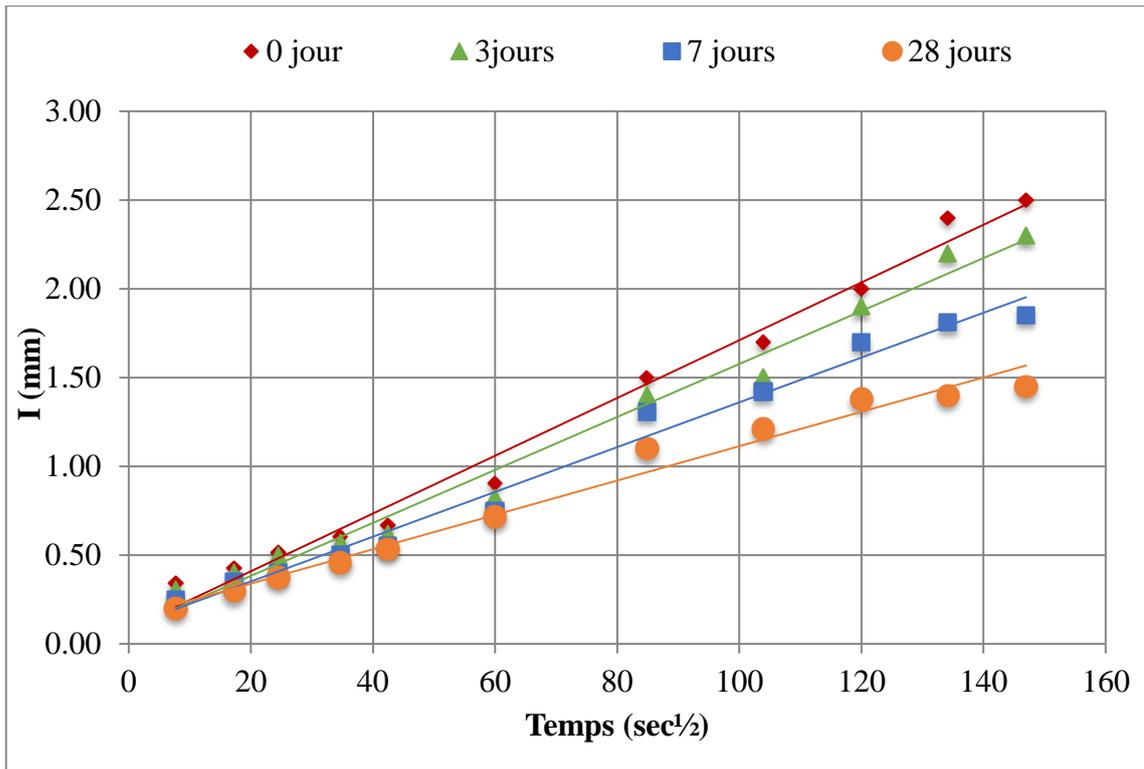


Figure 5.1: Effet de la durée de cure sur l'absorption capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 0% laitier.

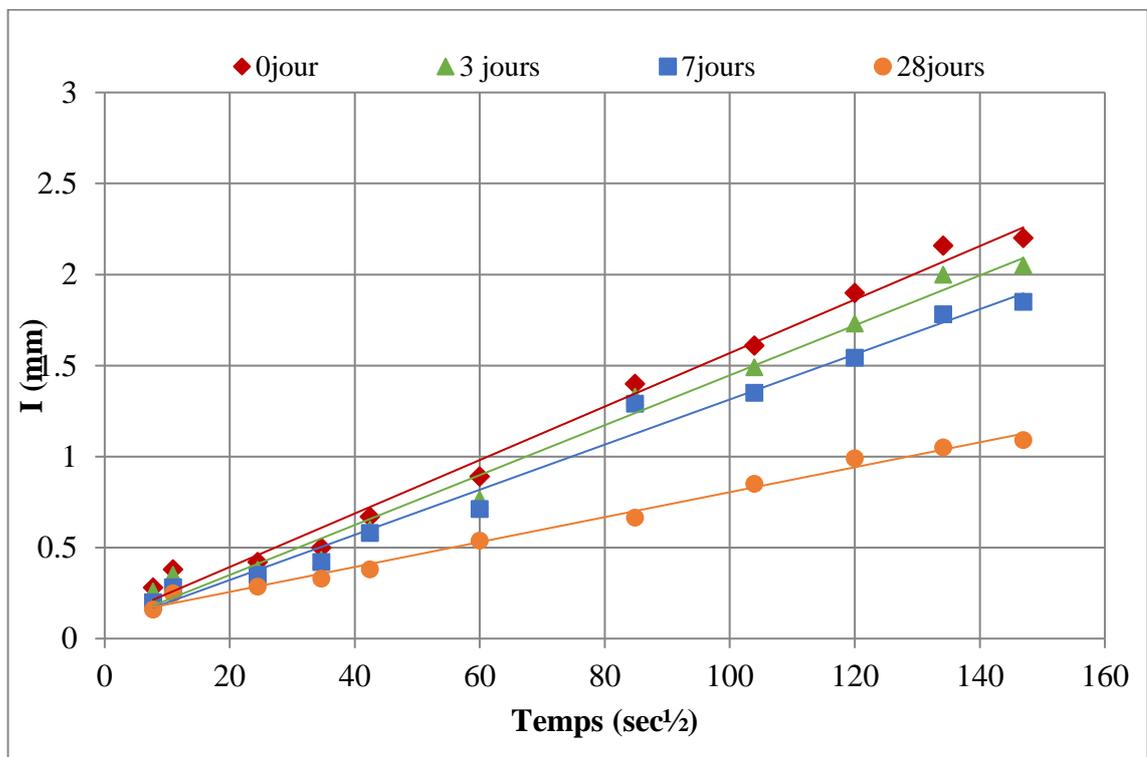


Figure 5.2: Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 15% laitier.

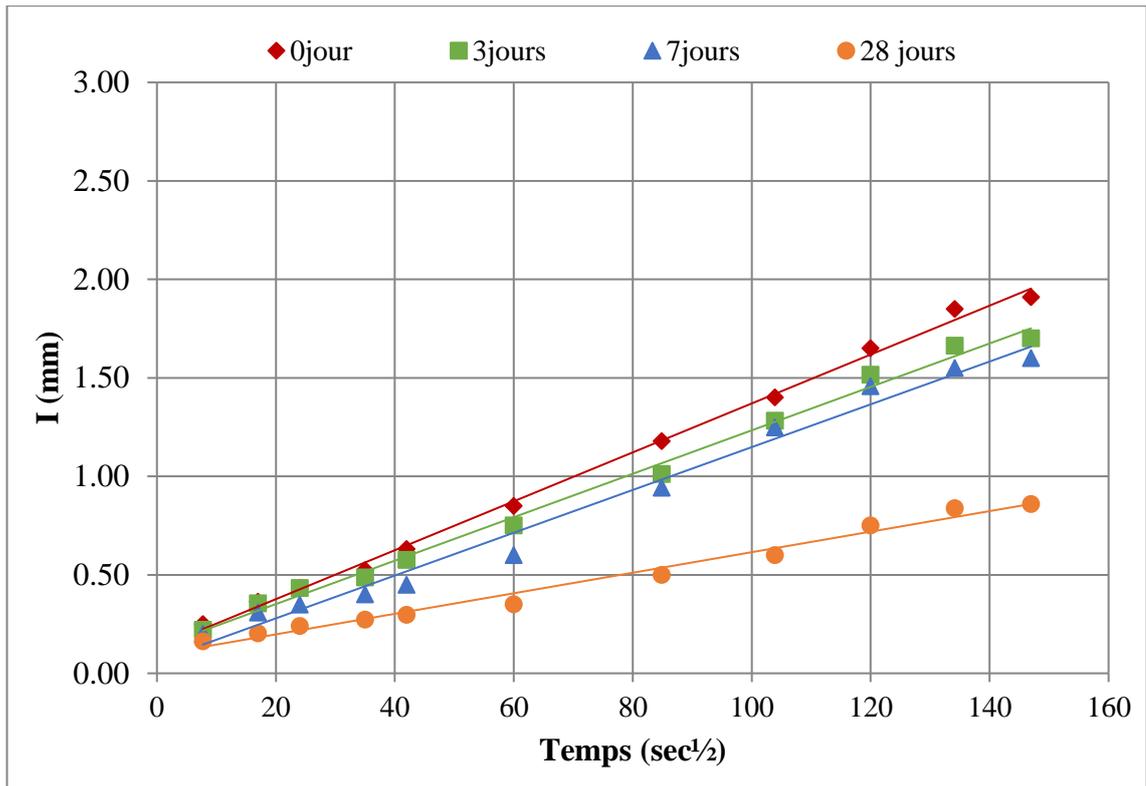


Figure 5.3: Effet de la durée de cure sur l'absorption d'eau capillaire par unité de surface des grands pores des BAP à base de 25% laitier.

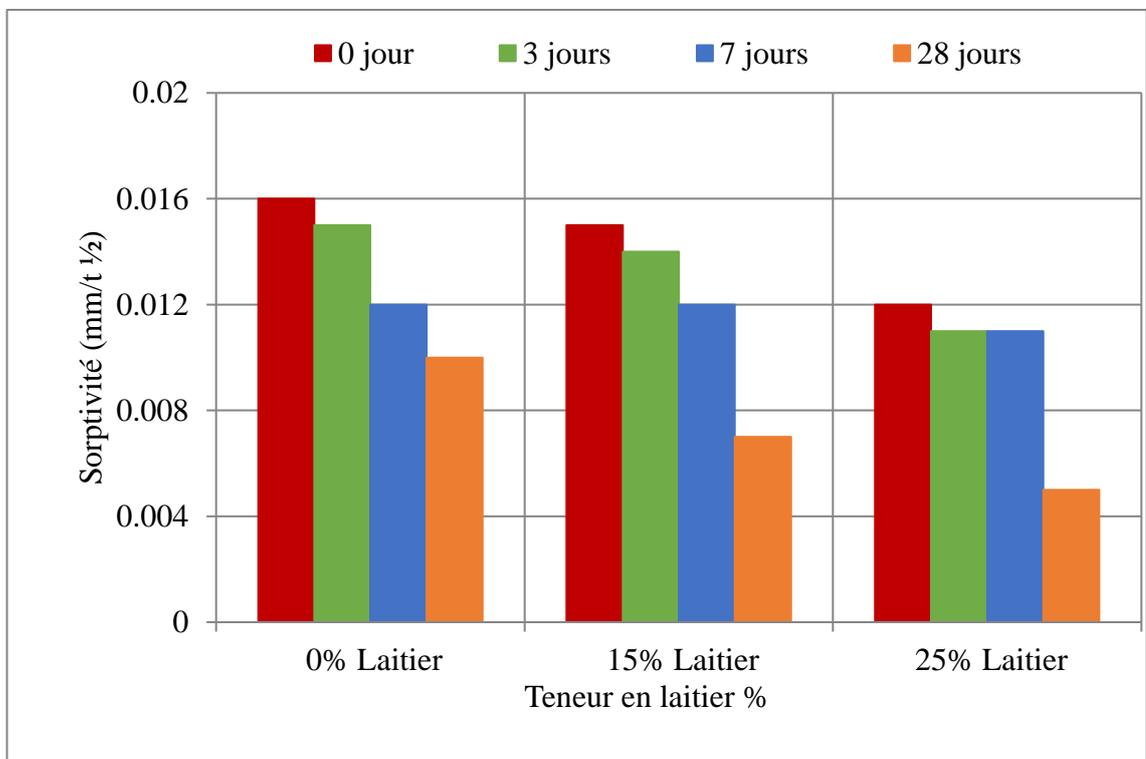


Figure 5.4: Effet de la durée de cure sur la sorptivité des grands pores des BAP à base de laitier.

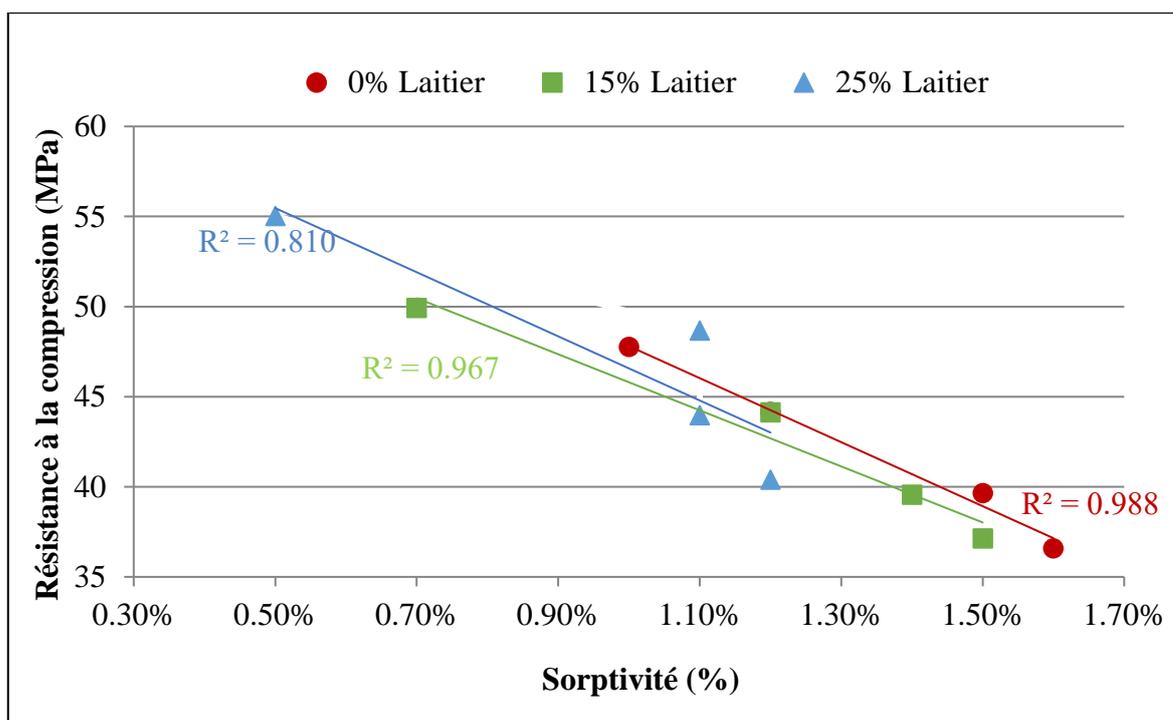


Figure 5.5: Corrélation entre la résistance à la compression et la sorptivité.

### 5.3. La perméabilité à l'eau

Les résultats de la perméabilité à l'eau des BAP sont représentés dans le tableau 5.2 et illustrés sur la figure 5.6.

Tableau 5.2: Perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure

| La pénétration d'eau (mm) |               |                |                |
|---------------------------|---------------|----------------|----------------|
| Mode de cure              | BAP0% laitier | BAP15% laitier | BAP25% laitier |
| 0 jour                    | 34.5          | 32.5           | 14             |
| 3 jours                   | 26.5          | 24             | 13             |
| 7 jours                   | 23.5          | 21.5           | 11             |
| 28 jours                  | 21.5          | 19.5           | 8              |

La figure 5.6 montre que la perméabilité d'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure humide. Les essais de perméabilité à l'eau ont été effectués à 90 jours de durcissement, dont les durées de cures sont 0, 3, 7 et 28 jours, sont ensuite conservés à l'air libre sur la toiture du laboratoire. La profondeur de pénétration de l'eau des BAP diminue

avec l'augmentation de l'âge de cure. La profondeur de pénétration d'eau dépend fortement de la durée de cure, plus la durée de cure est faible plus la pénétration d'eau dans le béton est grande. Il a été constaté que les éprouvettes qui ont été conservé dans l'eau pendant 28 jours de cure présentent une diminution de perméabilité de 38% par rapport à celles maintenues l'air libre dans un climat chaud pour un béton de référence sans laitier.

Par ailleurs, pour une durée de cure de 3 et 7 jours, la pénétration d'eau dans le béton représente une diminution de 23, et 32% de celle de zéro jour de cure respectivement. Ceci est dû à l'obturation des pores et diminution de la perméabilité par l'hydratation continue du ciment dans l'eau. Par contre, le climat chaud sert à produire un pourcentage élevé des gros pores et moins uniformes. Une diminution de la profondeur de la perméabilité de l'ordre de 6,9,8 et 9 % pour les BAP de 15 % de laitier par rapport au BAP de référence après une durée de cure de 3,7 et 28 jours respectivement est observée et de l'ordre de 60,51, 53 et 63% pour les BAP de 25% de laitier par rapport au BAP de référence après une durée de cure de 3,7 et 28 jours respectivement. Les BAP avec 25% du laitier présentent une profondeur de pénétration d'eau nettement inférieure à celle du béton de référence sans ajout.

On remarque que 25% de laitier présente la perméabilité la plus faible, ce qui confirme les résultats précédents. Ceci peut être expliqué par l'effet positif du laitier à long terme par sa lente hydratation qui se traduit par la diminution de la taille des pores de la structure et réduit de ce fait la perméabilité des BAP au laitier.

Al-Khaiat et Haque [142] ont montré que la profondeur de pénétration de l'eau, qui indique la perméabilité, s'est avérée beaucoup plus sensible à la cure initiale des bétons. Alors que la résistance à la compression des éprouvettes exposées à des conditions ambiantes au bord de la mer au Koweït était plus élevée que celles conservées dans l'eau, leur pénétration de l'eau est presque doublée lorsque la cure initiale était de 1 jour. Ces résultats indiquent l'importance de la cure initiale des structures côtières dans un climat chaud.

Martin et Hans [19] ont observé que la perméabilité augmente de 13 à 62% lorsque la température est augmentée de 20 à 50 °C et 3 à 55% pour une augmentation de 80 °C. Amrane et Kenai [128] ont observé que les perméabilités à 60 jours des bétons aux laitiers et du béton témoin sont très comparables. Le laitier Algérien a une faible réactivité mais il aura le temps de remplir les pores et réduit leur perméabilité.

El-Amiri [5] a trouvé une amélioration de la perméabilité de l'ordre de 40 à 75%, pour un béton avec 30% de laitier, par rapport au béton sans laitier, après 6 mois de cure humide. Selon Iyoda et Sagawa [143], à court terme, en absence de cure humide, un béton avec 55% de laitier présente une perméabilité à l'eau élevée. Cependant, une cure humide de 7 à 28 jours conduit à une amélioration de la perméabilité de ce dernier.

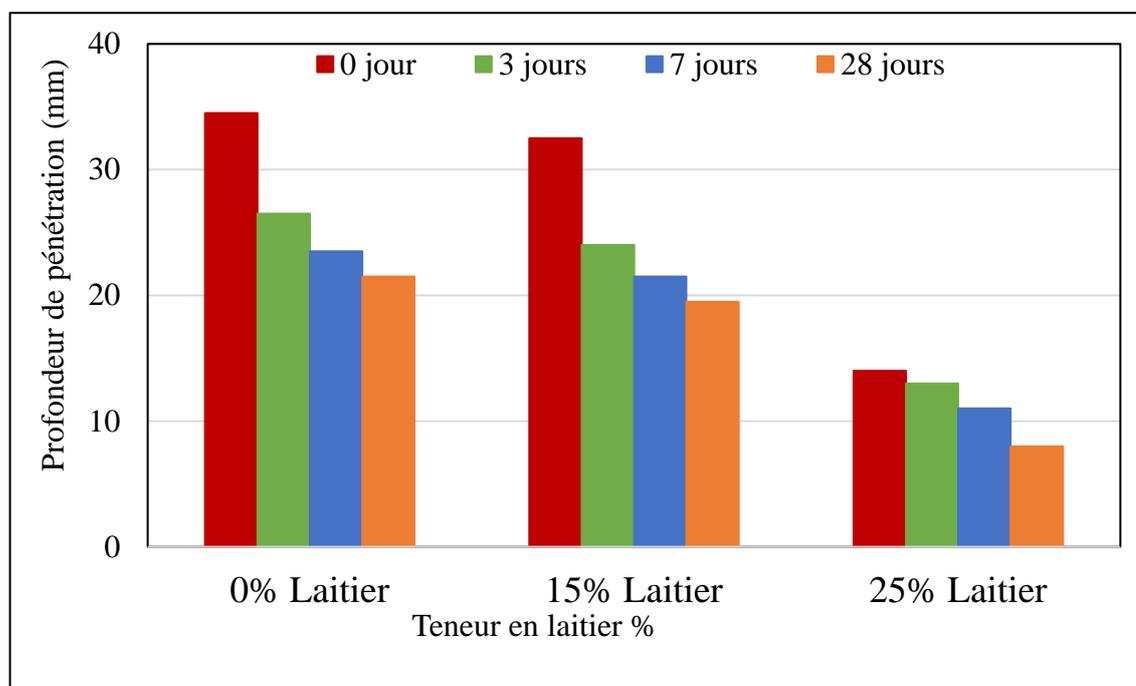


Figure 5.6: Effet de la durée de cure sur la profondeur de pénétration d'eau.

La relation entre la résistance à la compression et la profondeur de pénétration d'eau est illustrée sur la figure 5.7. On observe une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de la profondeur de pénétration d'eau. Les coefficients de corrélations sont 0.863, 0.744 et 0.992 avec un pourcentage de laitier 0, 15 et 25%, respectivement. Ceci peut être expliqué par le fait que la perméabilité à l'eau dépend de la surface spécifique, de la dimension et de la tortuosité avec laquelle une structure poreuse est connectée et la longueur moyenne relative du parcours d'une particule de fluide d'une extrémité à l'autre d'un corps poreux. Berhane [3] rapporte, qu'au-dessus d'une certaine limite, un taux élevé d'évaporation diminuera la maniabilité et peut entraîner une fissuration par retrait plastique, qui à son tour engendrera des effets négatifs sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Les bétons binaire et ternaire conservés dans un environnement standard présentent une perméabilité plus faible que ceux conservés en climat chaud. La perméabilité diminue significativement en fonction d'augmentation de la fumée de silice. Cependant, pour un taux

de substitution de la fumée de silice élevé, la perméabilité du béton est légèrement affectée par les conditions de cure [144].

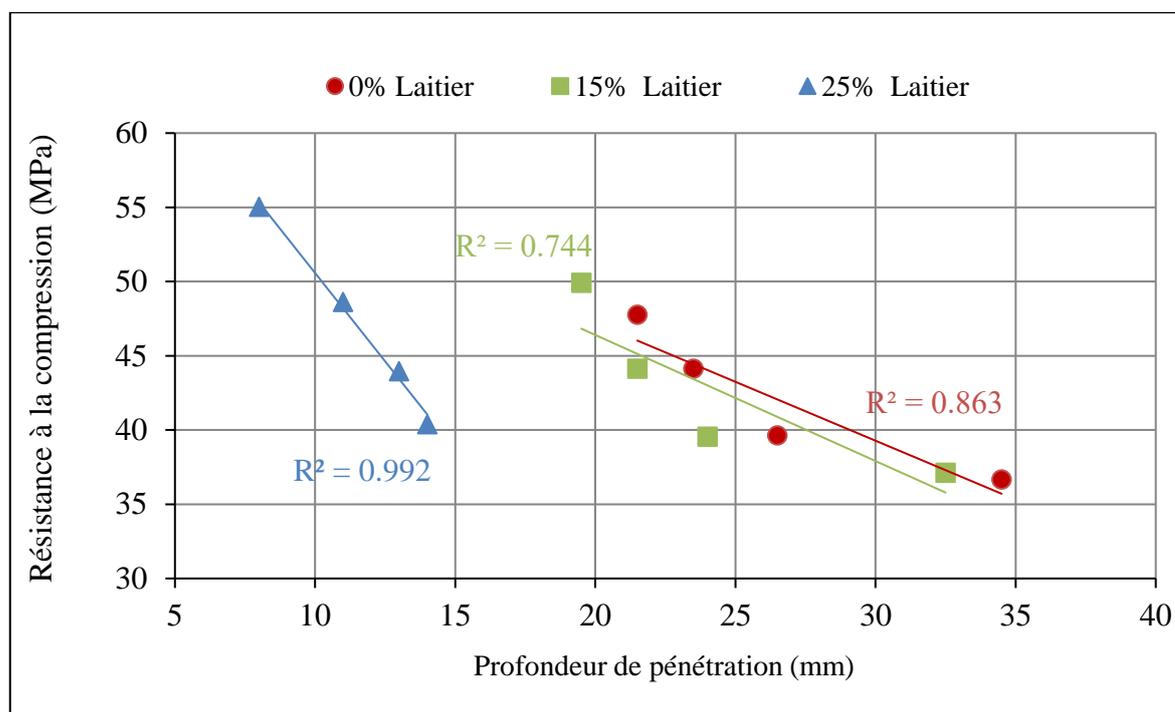


Figure 5.7: Corrélation entre la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure.

#### 5.4. Porosité accessible à l'eau

Les résultats de la porosité accessible sont présentés dans le tableau 5.3 et illustré sur la figure 5.8.

Tableau 5.3 : Porosité  $P_{wv}$  en fonction de la teneur en laitier et la durée de cure

| Mode de cure | BAP0% laitier | BAP15% laitier | BAP25% laitier |
|--------------|---------------|----------------|----------------|
| 0 jour       | 0.161         | 0.138          | 0.135          |
| 3 jours      | 0.158         | 0.131          | 0.130          |
| 7 jours      | 0.150         | 0.126          | 0.122          |
| 28 jours     | 0.146         | 0.112          | 0.107          |

On remarque que la porosité diminue en fonction de la durée de cure. Les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage présentent la plus mauvaise performance en termes de porosité c.-à-d. le pourcentage le plus élevé de porosité. Pour un BAP de référence sans ajout, les éprouvettes conservées à l'air libre conduit à une diminution de porosité de 0.32,

1.10 % et 1.46 % par rapport à celle conservée après une durée de cure initiale de 3, 7 et 28 jours respectivement. Les éprouvettes conservées à l'aire libre conduit à une diminution de porosité de 0.64, 1.23 et 2.55 % par rapport à celle conservée après une durée de cure initiale de 3, 7 et 28 jours, respectivement pour une teneur de laitier de 15 %. Pour un taux de substitution du ciment par le laitier de 25% du poids de ciment, Les éprouvettes conservées à l'aire libre conduit à une diminution de porosité de 0.52, 1.32 et 2.78% par rapport à celle conservée après une durée de cure initiale de 3, 7 et 28 jours, respectivement. On a constaté aussi qu'une substitution de 15 % de ciment par le laitier engendre une diminution moyenne de la porosité de 2.31, 2.64 ; 2.44 et 3.40% pour une durée de cure de 0,3 ,7 et 28 jours respectivement. En revanche, l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier à 25% du poids de ciment induit une diminution de porosité 2.60, 2.80, 2.82 et 3.92% pour une durée de cure de 0,3, 7 et 28 jours respectivement. Les BAP avec 15% et 25 % de laitier présentent une porosité assez comparable, avec une légère augmentation de porosité pour le BAP avec 15% de laitier. Les bétons contenant du laitier présentent une porosité plus faible que celle du béton de référence. Ceci est peut-être expliqué par le raffinement des pores capillaires de la matrice cimentaire du béton durci avec l'avancement d'hydratation.

Ramezaniapour et Malhotra [11] ont constaté que les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage montrent la plus mauvaise performance en termes de développement de résistance, de porosité et de résistance à la pénétration des ions chlore. La cure humide continue du béton est indispensable pour obtenir une résistance élevée, une faible porosité et une résistance plus élevée à la pénétration des ions chlore. Le mortier témoin montre la plus faible porosité totale, suivie par le mortier de 50% et 25% de laitier, mortier de fumée de silice, mortier à haute teneur en cendres volantes (HVFA) et enfin un mortier à base de 25% de cendres volantes. Les effets bénéfiques de l'utilisation du laitier, des cendres volantes et de fumées de silice ne sont pas reflétés par les résultats ci-dessus, parce que les réactions d'hydratation dans le cas du laitier, et les réactions pouzzolanique dans le cas des cendres volantes et des fumées de silice procèdent à une vitesse relativement lente.

La figure 5.9 montre la relation entre la résistance à la compression à 90 jours et la porosité accessible des BAP à base de laitier. Cette corrélation confirme que la résistance mécanique est en relation avec leur porosité accessible à l'eau dont les coefficients de corrélations sont 0.963, 0.985 et 0.997 pour un taux de substitution du ciment par le laitier de 0,15 et 25%

respectivement. Pour cela, on peut dire que la porosité est une fonction inverse de la résistance à la compression, plus la porosité augmente plus la résistance diminue.

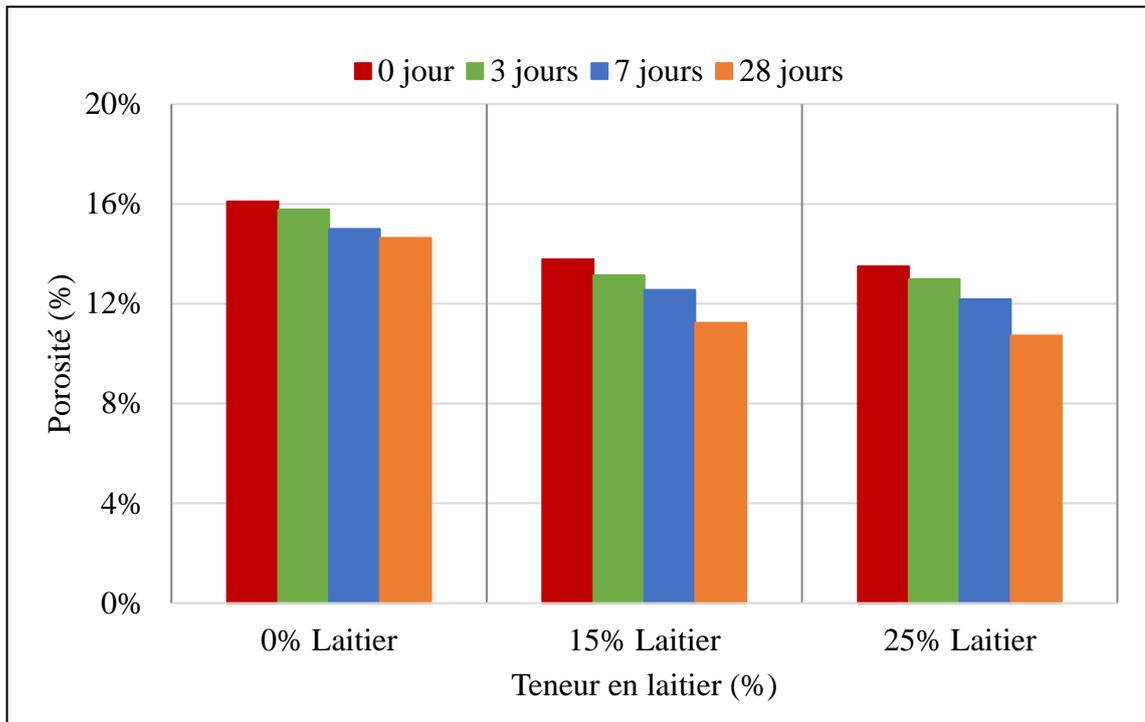


Figure 5.8: Effet de la durée de cure sur la Porosité accessible à l'eau des BAP à base de laitier.

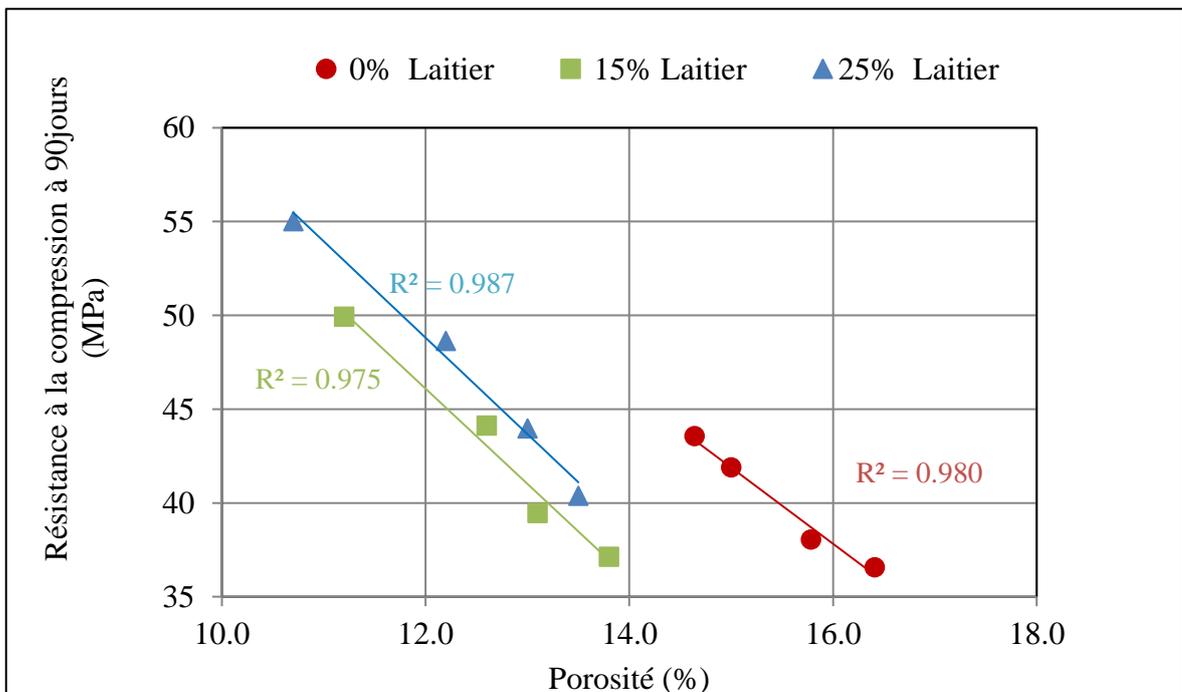


Figure 5.9: Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité accessible à l'eau.

### 5.5 Pénétration aux ions chlore

Les résultats de la perméabilité aux ions chlore sont illustrés sur la figure 5.10. Les résultats représentés sur la figure 5.10 indiquent que la cure initiale affecte considérablement la pénétration des ions chlore et que des échantillons qui ont subi une cure humide ont des valeurs de pénétration de chlorure significativement inférieures à celles des échantillons de BAP durcis à l'air libre quel que soit la durée de cure initiale.

On constate une diminution significative de la charge passée en fonction de la durée de cure. La valeur de pénétration des chlorures la plus faible a été observée après 28 jours de cure. On note que pour un BAP de référence, la pénétration des chlorures diminue de 7, 19 et 34% pour une durée de cure de 3, et 28 jours respectivement par rapport à 0 jours de cure. On constate que le taux de substitution du 25% du ciment par le laitier présente la perméabilité aux ions chlore la plus faible. Par contre 15% du laitier présente une perméabilité aux ions chlore plus importante par rapport au BAP de référence.

D'après Vinh [79], une maturation à 35°C augmente légèrement le coefficient de migration quelle que soit la solution de maintien de rhéologie employée (ajout d'eau ou surdosage en adjuvant). En revanche, avec une maturation à 20°C, cette grandeur ne semble pas être affectée de manière significative.

La perméabilité des ions chlore des BAP diminue considérablement par incorporation de cendre volante [61]. L'incorporation de laitier de haut fourneau dans le BAP a entraîné une baisse de coefficient de diffusion des ions chlore par rapport au BAP de référence. En outre, l'augmentation du taux de substitution de cendres volantes et le laitier de haut fourneau de 0% à 30% diminue le coefficient de diffusion des ions chlore de BAP considérablement [11].

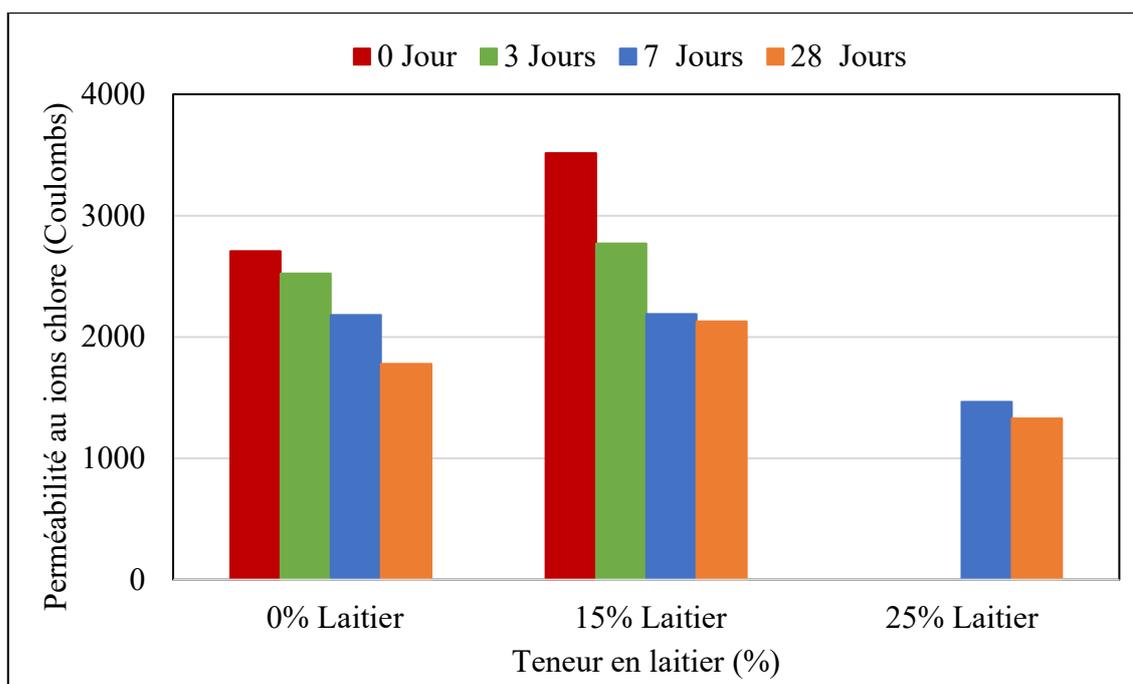


Figure 5.10: Effet de la durée de cure sur perméabilité aux ions chlore.

### 5.6. Conclusion

Les résultats obtenus sur le BAP à base du laitier en climat chaud, révèlent que :

- L'élévation de la température de murissement des BAP tend à augmenter la porosité, l'absorption capillaire et la perméabilité à l'eau.
- L'effet de la cure humide sur l'ensemble des propriétés de durabilité étudiées dans ce chapitre est favorable à long terme.
- Le coefficient d'absorption capillaire diminue de 11% et 26 % pour un BAP de 15 et 25 de laitier respectivement par rapport au béton de référence pour trois jours de cure.
- La substitution de 15 et 25% du ciment par le laitier engendre une diminution moyenne de la porosité de 17% et 20% respectivement.
- Les bétons qui n'ont reçu aucune cure après démoulage présentent la plus mauvaise performance en termes de porosité. Les BAP avec 15% et 25 % de laitier présentent une porosité assez comparable, avec une légère augmentation de porosité pour le BAP avec 15% de laitier.

- La durabilité des BAP s'améliore avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par le laitier à 90 jours.

## Conclusion générale

Notre travail s'intègre dans une problématique générale qui vise à comprendre l'effet du climat chaud sur les propriétés du béton autoplaçant à base de laitier à l'état frais et à l'état durci. Les essais ont été réalisés durant la période d'été. L'étude expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de mini cône et de V-funnel effectués sur mortier, ont pour objectif de déterminer le dosage optimal en superplastifiant. Au vu de ses résultats, le dosage nécessaire pour la formulation de BAP est de 1.6%.
- L'augmentation du dosage en superplastifiant et la teneur en laitier diminue la stabilité du BAP à l'état frais est conduit à une ségrégation importante.
- L'incorporation de laitier de haut fourneau en tant qu'additions minérales dans les BAP influe d'une manière significative sur les propriétés rhéologiques du BAP. Le taux de substitution de 25% du ciment par le laitier correspond à un dosage optimal.
- La substitution du ciment par le laitier améliorer l'ouvrabilité du BAP, ce qui induit une augmentation du diamètre d'étalement et diminution du temps d'écoulement  $T_{50}$  et  $T_{VF}$ . Autrement dit, les paramètres rhéologiques sont inversement proportionnels à l'étalement des BAP.
- Les corrélations trouvées entre les paramètres rhéologiques et les caractéristiques du BAP à l'état frais confirment le comportement du béton contenant du laitier qui améliore l'ouvrabilité des bétons.
- L'étude du comportement rhéologique des BAP contenant du laitier a montré que l'augmentation de la substitution du ciment par le laitier diminue la viscosité et le seuil de cisaillement du BAP.
- La résistance à la compression maximale a été obtenue pour un taux de substitution du ciment par le laitier de 25% et les meilleures valeurs de porosité, perméabilité à l'eau, perméabilité aux ions chlore et l'absorption capillaire ont été obtenues à ce pourcentage.
- L'augmentation de la substitution du ciment par le laitier de 15 et 25% en poids de ciment conduit à une résistance à 28 jours qui se rapproche de celle du ciment sans ajout, quel

que soit la durée de cure montrant aussi que le degré d'hydratation du laitier est faible à court terme.

- Les essais de durabilité sur les BAP à base de laitier ont mis en évidence les effets de la microstructure. La porosité du béton sans laitier est légèrement plus importante que celle du béton avec laitier. Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en laitier dans le béton conduit à une augmentation de la compacité de ce dernier.
- Dans un climat chaud, le manque de cure humide donne des porosités très élevées et par conséquent une durabilité amoindrie.
- Dans un climat chaud, le paramètre le plus important pour acquérir les performances requises est une cure humide suffisamment longue. L'effet de la cure humide sur les BAP contenant du laitier a été montré clairement par les BAP ayant subi une cure humide précoce ont développé une meilleure durabilité.
- L'utilisation du béton autoplaçant contenant du laitier permet à long terme de créer un réseau poreux plus fin et moins connecté à long terme.
- La conservation des éprouvettes à l'air libre contribue à des modifications physico-chimiques qui conduisent à une augmentation de la porosité, la perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire par rapport à celle conservées dans l'eau douce. Ces deux paramètres sont liés à l'accroissement de la taille des pores capillaires, la détérioration de la matrice cimentaire et à l'apparition de microfissuration.
- L'absorption capillaire, la perméabilité à l'eau, la porosité et la perméabilité aux ions chlore sont affectées par l'élévation de la température de maturation induisant des modifications du réseau poreux (volume total poreux, taille des pores, connectivité et tortuosité) qui peut s'expliquer par l'hétérogénéité des phases hydratées du laitier ayant subi des élévations de température de maturation.
- Une bonne corrélation a été obtenue entre la résistance à la compression d'une part et la porosité, perméabilité à l'eau et l'absorption capillaire d'autre part.

### **Recommandations et perspectives**

Cette étude a été limitée par le temps et les moyens disponibles. Nous proposons de la compléter par d'autres investigations sur :

- Confection du BAP dans un environnement simulant le climat chaud.
- Effet du climat chaud sur les performances des BAP à base des ajouts minéraux combiné.
- Influence de la température ou l'humidité seule sur le béton pour estimer quel paramètre a le plus grand effet.
- L'effet du climat chaud sur le retrait plastique et le retrait de séchage des BAP.
- Effet du climat chaud sur la microstructure des BAP à long terme.
- Préviation de la performance des BAP dans un climat chaud par les réseaux neurones.

- [1] ACI 305R-10, American Concrete Institute, Guide to Hot Weather Concreting, October 2010.
- [2] Mouret M., Contribution à l'étude des phénomènes d'altération des résistances des bétons confectionnés par temps chaud, Thèse de Doctorat de l'université de Sabatier, 1997.
- [3] Berhane Z., The behaviour of concrete in hot climates, *Materials and Structures*, vol. 25, 147, 1992, pp. 157-162.
- [4] Yahiaoui W., Kenai S., Menadi B. et Kadri E-H., Durability of self compacted concrete containing slag in hot climate, *Advances in Concrete Construction*, Vol. 5, No. 3 ,2017, pp 271-288.
- [5] El Amiri A., Durability of concrete in hot Climate, Thèse de doctorat de l'université de Leed, England, 1988.
- [6] Mamillan, Minard et Zanghellini, Bétonnage par temps chaud- par temps froid. Connaissance actuelles et recommandations, *Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics*, n°476, 1989, pp 78-83.
- [7] Hampton J.S., Extended workability of concrete containing high-range water-reducing admixtures in hot weather, In development in the use of superplasticizers. ACI special publication, Vol 68,1981, pp 409-422.
- [8] NF P15-431, Liants hydrauliques - Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal, Février 1994.
- [9] Ahmadi B.H., Initial and final setting time of concrete in hot weather, *Materials and Structures*, Vol. 33, October 2000, pp 511-514.
- [10] Soroka I. et Ravina D., Hot Weather Concreting with Admixtures, *Cement and Concrete Composites* 20, 1998, pp129-136.
- [11] Ramezani pour A.A. et Malhotra V.M., effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume, *Cement & Concrete Composites* , vol17 ,1995, pp125-133.

- [12] Shoukry S.N., William G.W. , Downie B. et Riad M.Y. , Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete , *Construction and Building Materials*, Vol 25, 2011, pp 688–696.
- [13] Al-Ani S.H. et Al-Zaiwary M.A.K, The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather, 1988, 21, pp 205-212.
- [14] Omar S., Al-Amoudi B., Maslehuddin M., Abiola T.O., Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather, *Construction and Building Materials*, Vol 18, Issue 10, December 2004, pp 737-743.
- [15] Asamoto S., Ohtsuka A., Kuwahara Y. , Miura C., Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete, *Cement and Concrete Research* ,Vol 41, Issue 6, June 2011, pp 590-601.
- [16] Nasir M., Omar S. Al-Amoudi B., Maslehuddin M., Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather, *Construction and Building Materials* ,Vol 152, 15 October 2017, pp 943-953.
- [17] Waheeb A. Al-Khaja., Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes, *Construction and Building Materials*, Vol 11, No. 1, 1997, pp. 9-13.
- [18] Bastidas-Arteaga E., Chateauneuf A. , Sanchez-Silva M., Bressolette Ph., et Schoefs F., Influence of weather and global warming in chloride ingress into concrete: A stochastic approach, 2010 , 238–249.
- [19] Martin J. and Hans W. R., Permeability and diffusivity of concrete as function of temperature, 2002, 1497–1504.
- [20] Page C.L., Short N. R., El Tarras A., Diffusion of Chloride ion in hardened cement pastes, *Concrete Research*, Vol 11, 1981, pp. 395-406.
- [21] Niyazi U.K et Fikret T, Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types, 2007, pp 634–645.

- [22] Tasdemir C. , Tasdemir M.A., Lydon F.D. et Barr B.I.G., Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol 26, Issue 1, January 1996, pp 63-68.
- [23] Diederich P., Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III - Paul Sabatier , 2010.
- [24] Petersson O. et Billberg P.Van B. K., A model for self-compacting concrete, *Proceedings of International RILEM Conference on production and workability of concrete*, RILEM, 1999.
- [25] Oh S.G.,Noguchi T.,et Tomosawa F.,Towards mix design for rheology of self compacting concret, *First International Symposium on SCC* , Stockholm, Edited by Sharendahl and Petersson , RILEM publications PRO7, 1999, Cachan pp.361-372.
- [26] Abdi B., La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures, Mémoire de Maitrise des sciences Appliquées, Spécialité : génie civil, Sherbrooke, Québec, Canada, 2005.
- [27] Fiches Techniques, Tome2, les Bétons : Formulation, Fabrication et mise en œuvre, centre d'information sur le ciment et ses applications, 2005,pp 108-119.
- [28] Baron J., et Ollivier J.P., Les bétons – Bases et données pour leur formulation, Editions Eyrolles, 1996.
- [29] NF EN 206-9, Béton - Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant, 29/11/2014.
- [30] AFGC, Recommandations pour l'emploi des bétons auto plaçants, Document scientifique et technique, 2008.
- [31] El Barrak M., Contribution à l'étude de l'aptitude l'écoulement des bétons autoplaçants a l'état frais, Thèse de Doctorat de Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2005.
- [32] Soualhi H., Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental, Thèse de doctorat de l'université de Cergy –Pontoise, 2014.

- [33] Adjoudj M., Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton, Thèse en cotutelle, université de Cergy-Pontoise (France) et université Hassiba Ben Bouali De Chlef (Algérie), 2015.
- [34] Coussot P. et Louis Grossiord J., Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton, EDP Science, 2001.
- [35] Couarraze G. et Grossiord J., Initiation à la rhéologie, Paris: 3<sup>e</sup> Edition Lavoisier, 2000.
- [36] Amziane S., Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais, rapport de l'Habilitation, Université de Bretagne sud, 2005.
- [37] Vu T.S., Rhéologie des suspensions non newtoniennes, Thèse de doctorat de l'université de Paris–Est, 2010.
- [38] Huang N., Rhéologie des pâtes granulaires, Thèse de doctorat de l'université de Paris 6 – Pierre Et Marie Curie, 2006.
- [39] De Larrard F., Sedran T., Hu C., Sztikar J., Joly M. and Derkx F., Evolution of the workability of superplasticized concretes: assessment with BTRHEOM rheometer Glasgow, Scotland, June 3-5, 1996.
- [40] Elhilali A., Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fines calcaires et des fibres végétales, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2009.
- [41] Assié S., Durabilité des Bétons Autoplaçants, L'institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, 2004.
- [42] Wallevik O. et Gjørsv O., Development of a coaxial cylinder viscometer for fresh concrete, Properties of Fresh Concrete, Proceedings of the rilem colloquium, Chapman & Hall, Hanover, 1990.
- [43] Banfill P., Beaupré D., Chapdelaine F., De Larrard F., Domone P., Nachbaur L., Sedran T., Wallevikand O. et Wallevik J., Comparison of concrete rheometers, International tests at LCPC Nantes, October 2000, NISTIR 6819, ed. Ferraris C.F., Brower L.E, September, 2001.

[44] Derabla R., Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons autoplacants traités thermiquement, Thèse de doctorat de l'université 8 Mai 1945 – Guelma, 2015.

[45] Almuwbbber O., Haldenwang R., Mbasha W., Masalova I., The influence of variation in cement characteristics on workability and strength of SCC with fly ash and slag additions, *Construction and Building Materials*, Vol 160, 30 January 2018, pp 258–267.

[46] Saric-Coric M., Interactions superplastifiant - laitier dans les ciments au laitier. Propriétés des bétons, thèse de doctorat de l'Université de Sherbrooke, 2001.

[47] Khayat K. H., Workability testing, and performance of self-consolidating concrete, *ACI Materials Journal*. Vol 96, 1999, 346-353.

[48] Ramanathan P., Baskar I., Muthupriya P. et Venkatasubramani R., Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol 17(2), 2013, pp 465-472.

[49] Wang H.Y, and Lin C.C., A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC), *Construction and Building Materials*, Vol 42, 2013, pp 132–136.

[50] Vejmelkova E., Keppert M., Grzeszczyk S., Skalin ski B., et erny R., Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag , *Construction and Building Materials*, vol 25, 2011, pp1325–1331.

[51] Boukendakdji O., Kenai S., Kadri E.H. et Rouis F., Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete, *Construction and Building Materials*, Vol 23, 2009, pp 2593–2598.

[52] Gallias J. L., Kara-Ali R. et Bigas J. P., The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, *Cement and Concrete Research*, vol30, n° 10, 2000, pp 1543-1549.

[53] Lange F., Mörte H. et Rudert V., Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, *Cement and Concrete Research*, vol27, n° 10, 1997, pp 1481-1488.

- [54] Ahari R.S., Erdem T.K. et Ramyar K., Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, vol 75, 2015 , pp 89–98 .
- [55] Hocine S., Influence de type d'addition minérale sur le comportement physico-mécanique et sur la durabilité des bétons autoplaçants, Thèse de doctorat de INSA de Rennes, 2010.
- [56] Shi T .Y, Mori H., Kurokawa Y. et Tanigawa Y., A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol 20, 1998, pp 223–238.
- [57] Uysal. M, Yilmaz. K and Ipek. M, The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* 27, 2012, pp 263–270.
- [58] Ranjbar M.M, Madandoust S.R , Mousavi Y. and Yosefi S. , Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete, *Construction and Building Materials* ,Vol 47, October 2013, pp 806-813.
- [59] Gesoglu M., Guneyisi E., Erdogan O. E, Properties of self compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Construction and Building Materials* 23 ,2009, pp 1847–1854.
- [60] Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, 2002.
- [61] Gesoglu M., Guneyisi E. , Kocabag M.E. , Bayram V. and Mermerdas K., Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash, *Construction and Building Materials* 37 ,2012, pp 160–170.
- [62] Kostrzanowska-Siedlarz A. et Gołaszewski J., Rheological properties and the air content in fresh concrete for self-compacting high performance concrete, *Construction and Building Materials*, Vol 94, 30 September 2015, pp 555-564.
- [63] Kamal M.M., Safan M.A., Etman A.Z., Kasem B.M., Mechanical properties of self-compacted fiber concrete mixes, *HBRC Journal*, Volume 10, Issue 1, April 2014, pp 25-34.

- [64] Dinakar P., Kartik Reddy M., Sharma M., Behaviour of self-compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash, *Materials and Design* 46, 2013, pp 609–616.
- [65] Uysal M., The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete , *Construction and Building Materials*, Vol 37, 2012, pp 533–540.
- [66] Menéndez G., Bonavetti.V. and Irassar E.F., Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast furnace slag, *Cement and Concrete Research – Vol 25*,2003, pp 61-67.
- [67] Bernal J., Reyes E. , Massana J., León N., Sánchez E., Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol 160, 30 January 2018, pp 196-210.
- [68] Aarthia K.et Arunachalam K., Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes , *Journal of Cleaner Production*, Vol 174, 10 February 2018, Pages 247-255.
- [69] Les ouvrages en béton, Fiche technique Tome 03 : durabilité, dimensionnement et esthétique,2008.
- [70] Turk K., Caliskan S., and Yazicioglu S., Capillary water absorption of self compacting concrete under different curing conditions, 2007, pp 365-372.
- [71] Zhu W. et Gibbs J.C., Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol 35 (8), 2005, pp1457-1462.
- [72] Da Silva P.R. et De Brito J., Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler, *Construction and Building Materials*, Vol 86, 2015, pp 101–112 .
- [73] Chaïd R., Bali A., Jauberthie R. et Talah A., Comportement d'un béton à hautes performances à base de laitier en milieu sulfatique, *Revue des Sciences et de la Technologie*, Synthèse 24 , 2012,pp 91-99 .

- [74] Ramezani pour A.M. , Esmaeili. Kh. , Ghahari . S.A., Ramezani pour. A.A. , Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol 73, 2014, pp187–194.
- [75] Ghafoori N. et Diawara H., Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete, 2010, pp 946–955.
- [76] Griesser A., Cement-superplasticizer interactions at ambient temperatures: research, *Construction and Building Materials*, Vol 47, 2013, pp 245-253.
- [77] Golaszewski J.G., Szwabowski J., Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars, *Cement and concrete research*, Vol. 34, 2004, pp 235-248.
- [78] Ramezani pour A.A., Khazali. M.H , Vosoughi.P, Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete, *Construction and Building Materials*, 2013, PP 807-813.
- [79] An Le V., Comportement des bétons autoplaçant par temps chaud, Thèse de doctorat de Université de Toulouse PAUL SABATIER3 ,2014.
- [80] Dumne S. M., Effect of Superplasticizer on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash , *American Journal of Engineering Research (AJER)*, Vol 3, Issue-03, 2014, pp 205-211.
- [81] Weisheit S., Waldmann N. and Reger A., Influence of environmental conditions on the rheological properties of SCC, *Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Montréal, Canada, 2010,pp 453-460.
- [82] Heba A. M., Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions, Vol 2, 2011, pp 79–86.
- [83] Turkmen I. et Kantarci A., Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Indian Journal of Engineering & Materials*, Vol3, 2006, pp 247-252.
- [84] Zhao H., Sun W., Wu X., and Gao B., Effect of initial water-curing period and curing condition on the properties of self-compacting concrete, 2012, pp 194–200.

- [85] Bingöl A.F. and İlhan Tohumcu I., Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume, *Materials and Design*, Vol 51, 2013, pp 12–18.
- [86] Boukni. B., Contribution a l'étude expérimentale du comportement thermomécanique des bétons autoplaçants, Thèse Doctorat en science en Génie Civil. Université Mentouri Constantine, Juin 2012.
- [87] Chen H.J, Huang S.S., Tang C.W., Malek M.A., Ean. L.W., Effect of curing environments on strength, porosity and chloride ingress resistance of blast furnace slag cement concretes: A construction site study, *Construction and Building Materials*, Vol 35, 2012, pp 1063-1070.
- [88] El-Chabib H., Ibrahim A., The performance of high-strength flowable concrete made with binary, ternary, or quaternary binder in hot climate, *Construction and Building Materials*, Vol 47, 2013, pp. 245-253.
- [89] Zhao H., Sun W. , Wu X. , Gao B., The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures, *Journal of Cleaner Production*, Vol 95, 2015, pp 66-74.
- [90] Gallucci E., Zhang X., Scrivener K., Influence de la température sur le développement microstructural des bétons, Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF) 2 B, Toulouse, France, 2006, pp 19-20.
- [91] Reinhardt H. W., Stegmaier M., Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC, *Cement and Concrete Research*, Vol 36(5), 2006, pp 879-885.
- [92] Barluenga G., Palomar I., Puentes J., Hardened properties and microstructure of SCC with mineral additions, *Construction and Building Materials*, Vol 94 ,2015 ,pp 728–736.
- [93] Oliveira M.J., Ribeiro A.B., Branco F.G., Curing effect in the shrinkage of a lower strength self-compacting concrete, *Construction and Building Materials* ,Vol 93,15 September 2015, pp 1206-1215.

- [94] EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances - Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances, Septembre 2016.
- [95] Boukendakdji O., Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires, Thèse de Doctorat de l'université de Blida, 2010.
- [96] NF EN 197-1, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, Avril 2012.
- [97] Neville M., Propriétés des bétons, EYROLLES, Paris, 2000.
- [98] Chandra S., Waste materials used in concrete manufacturing, NOYES, New Jersey, USA, 15 janvier 2013 .
- [99] Naceri A. et Messaoudene I., Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier, Lebanese Science Journal, Vol 7, ( 2), 2006.
- [100] Arabi N., Jauberthie R., Sellami A., Influence de la substitution partielle de la chaux par le laitier granulé sur les phases formées en autoclave - cas des briques silico-calcaires, XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 30 Mai 2011, pp 108-117.
- [101] Laifa W., Behim M., Turatsinze A. et Ali-Boucetta T., Characterization of a self-compacting concrete with addition of crystallized slag and reinforced with polypropylene and diss fibers , Revu Science Technologie., Synthèse 29, 2014, pp 100-110.
- [102] NF P 15-301. Liants hydrauliques : Ciments courants ; composition, spécifications et critères de conformité, AFNOR, Paris, 2015.
- [103] NF EN 1008. Eau de gâchage pour bétons -Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, Juillet 2003, P18-211.
- [104] Okamura H., Ouchi M., Self-compacting Concrete, Journal of advanced concrete technology, vol 1, 2003, pp 5-15.
- [105] Okamura H., Ozawa K., Mix design method for self-compacting concrete, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, Vol 24(8), 1995, pp 496.

- [106] Domone P.L.J. et Jin J., Properties of mortar for Self-Compacting Concrete, Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, RILEM Proceedings PRO 7, Paris, 1999, pp109–120.
- [107] Soualhi H., Kadri E.H, Ngo T.-T., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., A Vane Rheometer for Fresh Mortar: Development and Validation, Journal Applied Rheology, 2013, DOI: 10.3933/APPLRHEOL-24-22594.
- [108] Mokeddem S., Contrôle de la rhéologie d'un béton et de son évolution lors du malaxage par des mesures en ligne à l'aide de la sonde Viscoprobe , Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes,2014.
- [109] Koehler E., Fowler D., Ferraris C., Amziane S., New portable rheometer for fresh self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, Vol 233, 2006,pp97-116.
- [110] NF EN 12390-3, Essai pour béton durci, Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Février 2003.
- [111] C1585 – 11, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic- Cement Concretes,2012.
- [112] DIN 1048, Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure, 2000.
- [113] CPCPC 11.3,Absorption d'eau par immersion sous vide, RILEM Recommandations.
- [114] C1202 – 12, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2012.
- [115] Bethmont S., Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [116] Lie Z. et Ding Z., Property improvement of portland cement by incorporating with metakaolin and slag, cement and concrete research, Vol 33, 2003, pp 579-584.
- [117] Park C.K., Noh M.H. et Park T.H. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures , Cement and concrete research, Vol 35, 2005, pp 842-849.

[118] Aarre T. et Domone P., Reference concretes for evaluation of test methods for SCC, International Proceedings of 3rd RILEM international symposium on self-compacting concrete, Reykjavik, Iceland; 2003, pp 495–505.

[119] Uysal M. et Yilmaz K., Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol 33, 2011, pp 771–776.

[120] ] Guneyisi E., Gesoglu M. et Ozbay E., Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol 24, 2010, pp 1878-1887.

[121] Dengwu J., Caijun S., Qiang Y., Xiaopeng A., Yu L., Huang L., Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete, cement and concrete composites, Vol 83, October 2017, pp 146-159.

[122] Uysal M. et Sumer M., Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures, *Construction and Building Materials*, Vol 25, 2011, pp 4112–4120.

[123] Madandoust R., Mousavi S.Y., Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin, *Construction and Building Materials*, Vol 35 , 2012, pp 752–760.

[124] Miao L., Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash”, *Construction and Building Materials* 24, 2010, pp 1245–1252.

[125] Uysal M., The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete , *Construction and Building Materials*, Vol 37, 2012, pp 533–540.

[126] Bilim C., Karahan O., Atis C.D. et Ilkentapar S., Influence of admixtures on the properties of alkali activated slag mortars subjected to different curing conditions, *Materials and Design*, Vol 44 ,2013,pp 540–547.

[127] Huang F., Li H., Yi Z., Wang Z. et Xie Y., The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent, *Construction and Building Materials*, Vol 166, 30 March 2018, pp 833-838.

- [128] Amrane A. et Kenai S., Propriétés mécaniques et Durabilité du béton au laitier en climat chaud , Proceeding du Séminaire international sur la Qualité du béton en climat chaud, Ghardaïa, 1994, pp106-122.
- [129] Hadj Sadok A., Kenai S. et Courard L., Perméabilité au gaz et aux ions chlore des mortiers à base de laitier de faible hydraulicité , INVACO2, Séminaire International, Innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction N° : 10-189.
- [130] Austin S. A, Robins E.J and Issaad A., Influence of Curing Methods on the Strength and Permeability of GGBFS Concrete in a Simulated Arid Climate. Cement and Concrete Composites, Vol 14, 1992, pp 157-167.
- [131] Muhammad Nasir M., Al-Amoudi O.S.B., Al-Gahtani H.J., Maslehuddin M., Effect of casting temperature on strength and density of plain and blended cement concretes prepared and cured under hot weather conditions, Construction and Building Materials, Vol 112 ,2016, pp529–537.
- [132] ACI 305R-10 American concrete institute, Guide to Hot Weather Concreting, October 2010.
- [133] Vivek S.S., Dhinakaran G., Fresh and hardened properties of binary blend high strength self-compacting concrete, Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol 20 ,2017, pp 1173–1179.
- [134] Dadsetan S. and Bai J., Mechanical and microstructural properties of self compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash, Construction and Building Materials, Vol 146 ,2017, pp 658–667.
- [135] Valcuende M., Benito F., Parra C., Miñano I., Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate, Construction and Building Materials, Vol 76, 2015, pp 1–9.
- [136] Ibrahim H.A., Razak H.A., et Abutaha F., Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method, Construction and Building Materials, Vol 147, 2017, pp 576–587.

- [137] Hadj Sadok A., Comportement des mortiers et bétons à base de ciments au laitier d'el hadjar dans des milieux agressifs, Thèse de doctorat de l'Université de Saad Dahlab De Blida, 2010.
- [138] Alexander M.G., Magee B.J., Durability performance of concrete containing condensed silica fume, *Cement and Concrete Research*, vol29, 1999, pp 917-922.
- [139] Guneyisi E. and Gesoglu M., A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag, *Materials and Structure*, vol 12, 2008, pp 225-230.
- [140] Jiang S.P and Grandet J., Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland, *Cement and Concrete Research*, vol19, 1989, pp 487-495.
- [141] Kockala N.U. et Turker F., Effect of environmental conditions on the properties of concretes with different cement types, *Construction and Building Materials* , Vol 21, Issue 3, March 2007, pp 634-645.
- [142] Al-Khaiat H. and Haque M.N., Effect of initial curing on early strength and physical properties of a lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 6,1998, pp 859–866.
- [143] Iyoda T., Sagawa Y., The effect of curing period on the durability of concrete using blast-furnace slag blended cement, *The 3rd ACF International Conference, ACF/VCA 2008*.
- [144] Khan M.I., Abbas Y.M., Curing optimization for strength and durability of silica fume and fuel ash concretes under hot weather conditions, *Construction and Building Materials*, *Construction and Building Materials*, Vol 157, 2017, pp 1092–1105.

## Annexe A

### Exemple de calcul de la composition du mortier

#### A.1 Les Données

Pour un volume du mortier de  $V=1.3$  l (par exemple)

Les masses volumiques absolues des constituants :

- Ciment :  $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Sable :  $\rho_S = 2584 \text{ kg/m}^3$
- Superplastifiant :  $\rho_{Sp} = 1070 \text{ kg/m}^3$
- Eau :  $\rho_E = 1000 \text{ kg/m}^3$

Coefficient d'absorption du sable  $A_b = 0.64\%$

On fixe le rapport Sable/Mortier  $S/M = 0.50$

On fixe le rapport (par poids)  $E/C = 0.40$  ou (par volume)  $E/C = 1.368$ .

Le superplastifiant (MEDAFOW 30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de :  $\%Sp = 1,6\%$  du poids de ciment (ou poudres).

#### A.2 Calcul d'humidité du sable

On pèse un échantillon de sable par exemple de masse  $M_1=300$  g (par exemple), on le met dans l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 8 minutes puis on le pèse une deuxième fois on obtient une masse  $M_2 = 295$  g et on calcul l'humidité du sable  $\mu_S$

$$\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

Donc le sable contient une certaine quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = \mu_S - A_b$$

#### A.3 Calcul des quantités de chaque constituant

### A.3.1 Le ciment

Le pourcentage en volume du ciment C% :

$$\%C_{vol} = \frac{(1-S/M)}{(1+E/C_{par\ volume})} * 100$$

La quantité de ciment C en kg:

$$C(kg) = \frac{V \times E / C_{par\ volume}}{100} \times \rho_c$$

### A.3.2 Le Sable

La quantité du sable en kg est S :

$$S(kg) = (1 + \frac{Correction}{100}) \times (\frac{V \times S / M \times \rho_s}{100})$$

### A.3.3 Le superplastifiant

La quantité du superplastifiant est Sp :

$$Sp(kg) = \frac{\%Sp \times C}{100}$$

### B.3.4. L'eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E<sub>1</sub>, qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E<sub>2</sub> (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume : %E<sub>vol</sub>

$$\%E_{vol} = \frac{(1-S/M) \times 100 \times E / C_{par\ volume}}{(1+E/C_{par\ volume})}$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left( \frac{V \times \% E_{vol}}{100} \times \frac{\rho_E}{1000} \right) - \left( \frac{Sp \times 70}{100} \right) - \left( \frac{V \times S / M \times \rho_S}{1000} \times \frac{correction}{100} \right)$$

Eau1       $E_1 = E \times 0.70$

Eau2       $E_2 = E \times 0.30$

## Annexe B

### Exemple de calcul de la composition du béton

Les mêmes démarches de la composition du mortier (Annexe A) sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

#### B.1 Les Données

Pour un volume de béton de  $V=30$  litres (par exemple)

- Les masses volumiques :
  - ❖ Masse volumique apparente du gravier :  $\rho_G = 1487 \text{ kg/m}^3$
  - ❖ Masse volumique absolue du gravier :  $\rho_{AG} = 2707 \text{ kg/m}^3$
  - ❖ Masse volumique absolue du sable :  $\rho_S = 2584 \text{ kg/m}^3$
  - ❖ Masse volumique absolue du ciment :  $\rho_C = 3040 \text{ kg/m}^3$
- Les coefficients d'absorption :
  - ❖ Coefficient d'absorption du sable :  $AbS = 0.64\%$
  - ❖ Coefficient d'absorption du gravier :  $AbG = 0,5\%$
- Le rapport Sable/Mortier :  $S/M = 0.50$
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage :  $A=1\%$  du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de  $E/C_{\text{volume}}=1.215$  par unité de volume de ciment et  $E/C_{\text{poids}} = E/C_{\text{volum}} / \rho_A = 0.40$  par unité de poids de ciment.

- Le pourcentage de superplastifiant (MEDAFLOW30) : %Sp= 1,6% du poids de ciment, le MEDAFLOW30 est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

## B.2 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse  $M_1$  et un échantillon de gravier de masse  $M'_1$  et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6 minutes pour le gravier et une durée de 8 minutes pour le sable, puis on pèse  $M_2$  et  $M'_2$  les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable :

$$\mu_s = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

L'humidité du gravier :

$$\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

## B.3 Calcul des différents composants

### B.3.1 Gravier

La quantité  $G$  en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton  $V$  :

$$G(kg) = \frac{G(kg / m^3) \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

### B.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume  $V$  de béton (S) :

Le pourcentage du gravier  $G$  dans le béton :

$$\%G = \frac{G(\text{kg} / \text{m}^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier  $M$  par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable  $S$  dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S / M}{100}$$

Quantité du sable  $S$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

$$S(\text{kg}) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( 1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

D'où on peut obtenir le rapport  $G/S$  de notre composition.

### B.3.3 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{\text{volume}}} \times \%P$$

La quantité de ciment  $C$  en (kg) pour un volume  $V$  de béton :

$$C(\text{kg}) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

### B.3.4 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton  $Sp$  (kg/m<sup>3</sup>)

$$Sp(kg / m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_c \times 10$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg / m^3) \times V$$

### B.3.5 Eau

L'eau ajoutée au béton ( $E$ ) est divisée en deux parties : la première partie ( $E_1$ ) est de 70% de ( $E$ ) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie ( $E_2$ ), elle de 30% de ( $E$ ) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (%E) :

$$\%E = \frac{E / C_{volume}}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau ( $e$ ) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable :  $e_1$

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000} \left( \frac{\mu_S - A_{bS}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le gravier :  $e_2$

$$e_2(kg) = \frac{G(kg / m^3) \times V}{1000} \left( \frac{\mu_G - A_{bG}}{100} \right)$$

L'eau contenue dans le superplastifiant :  $e_3$

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume V de béton :

$$E(kg) = \frac{\% E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

Eau1

$$E_1(kg) = 0.70 \times E$$

Eau2

$$E_2(kg) = 0.30 \times E$$