



**HAL**  
open science

# Impact de la rhéologie des matériaux cimentaires sur l'aspect des parements et les procédés de mise en place

Edgar Chuta Caceres

► **To cite this version:**

Edgar Chuta Caceres. Impact de la rhéologie des matériaux cimentaires sur l'aspect des parements et les procédés de mise en place. Matériaux. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT : 2018PESC1004 . tel-01982159

**HAL Id: tel-01982159**

**<https://theses.hal.science/tel-01982159v1>**

Submitted on 15 Jan 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse présentée pour obtenir le grade de  
**Docteur de l'Université Paris-Est**

Spécialité : Génie Civil

par

**Edgar CHUTA CACERES**

École Doctorale : SCIENCES, INGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT

***Impact de la rhéologie des matériaux cimentaires  
sur l'aspect des parements et les procédés de mise  
en place***

Thèse soutenue le 26 Juin 2018 devant le jury composé de :

|                     |                           |   |
|---------------------|---------------------------|---|
| Ali-Nordine LEKLOU  | <i>Rapporteur</i>         | Maître de conférences, HdR-Université de Nantes     |
| Christophe LANOS    | <i>Rapporteur</i>         | Professeur, IUT de Rennes                           |
| Horacio COLINA      | <i>Examineur</i>          | Directeur du pôle Recherche de l' ATILH             |
| Abdelhak KACI       | <i>Examineur</i>          | Maître de conférences, Université de Cergy Pontoise |
| Zoubeir LAFHAJ      | <i>Examineur</i>          | Professeur, Ecole centrale de Lille                 |
| Farid BENBOUDJEMA   | <i>Examineur</i>          | Professeur, Ecole normale supérieure Paris-Saclay   |
| Jena JEONG          | <i>Directeur de thèse</i> | Enseignant-Chercheur, HdR ESTP-Paris                |
| Justin DIRRENBARGER | <i>Invité</i>             | Professeur, CNAM de Paris                           |
| Eric STORA          | <i>Invité</i>             | Responsable technologie et mise en oeuvre-CERIB     |



# Table des matières

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>I</b>  | <b>RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE</b>  | <b>5</b>  |
| <b>I</b>  | <b>Parements bruts de décoffrage</b>  | <b>7</b>  |
| I.1       | Introduction . . . . .  | 7         |
| I.2       | Peau du béton et sa teinte . . . . .  | 9         |
| I.3       | Paramètres influençants la teinte des parements bruts . . . . .                   | 10        |
| I.3.1     | Composition du béton . . . . .  | 12        |
| I.3.2     | Minéralogie des surfaces . . . . .  | 14        |
| I.3.3     | Morphologie et rugosité des surfaces . . . . .                                    | 15        |
| I.3.4     | Surface du moule et produit de démoulage . . . . .                                | 17        |
| I.3.5     | Mise en place et compactage . . . . .   | 19        |
| I.3.6     | Temps de décoffrage et conditions climatiques . . . . .                           | 20        |
| I.4       | Conclusions . . . . .   | 21        |
| <b>II</b> | <b>Rhéologie des matériaux cimentaires</b>  | <b>23</b> |
| II.1      | Introduction générale . . . . .   | 23        |
| II.1.1    | Suspension . . . . .  | 23        |
| II.1.2    | Hydratation de la pâte de ciment . . . . .  | 24        |
| II.1.3    | Description physique du seuil . . . . .   | 28        |
| II.2      | Comportement rhéologique de matériaux cimentaires . . . . .                       | 29        |
| II.2.1    | Introduction . . . . .  | 29        |
| II.2.2    | Approche classique de comportement rhéologique . . . . .                          | 31        |
| II.2.3    | Approche modifiée par Papanastasiou . . . . .                                     | 33        |
| II.3      | Erreurs de mesure du comportement rhéologique des matériaux cimentaires . . . . . | 35        |
| II.4      | Paramètres influant sur la rhéologie du béton frais . . . . .                     | 37        |
| II.5      | Techniques de mesures expérimentales de l'écoulement . . . . .                    | 40        |
| II.6      | Conclusions . . . . .   | 45        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>II</b>  | <b>PARTIE EXPÉRIMENTAL</b>   | <b>47</b>  |
| <b>III</b> | <b>Variation de la teinte et de la rugosité des surfaces des matériaux cimentaires</b> | <b>49</b>  |
| III.1      | Méthodes et instruments d'essai . . . . .  | 49         |
| III.2      | Variation de la teinte des surfaces . . . . .  | 53         |
| III.2.1    | Pâtes de ciment . . . . .  | 53         |
| III.2.2    | Mortier normalisé . . . . .  | 60         |
| III.2.3    | Comparaison des résultats entre les pâtes de ciment et les mortiers . . . . .          | 68         |
| III.3      | Conclusions . . . . .  | 70         |
| <b>IV</b>  | <b>Rhéologie expérimentale des matériaux cimentaires</b>                               | <b>73</b>  |
| IV.1       | Pâte de ciment . . . . .   | 73         |
| IV.1.1     | Composition et préparations des pâtes de ciment . . . . .                              | 73         |
| IV.1.2     | Masse volumique des pâtes de ciment . . . . .  | 74         |
| IV.1.3     | Concentration de solides . . . . .   | 75         |
| IV.1.4     | Distance entre deux particules de ciment . . . . .                                     | 75         |
| IV.1.5     | Essais rhéologiques . . . . .  | 77         |
| IV.1.6     | Variation de la rhéologie des pâtes en fonction du rapport E/C . . . . .               | 82         |
| IV.2       | Mortier . . . . .  | 91         |
| IV.2.1     | Composition et préparations des mortiers . . . . .                                     | 91         |
| IV.2.2     | Masse volumique des mortiers frais . . . . .   | 91         |
| IV.2.3     | Essais rhéologiques . . . . .  | 91         |
| IV.2.4     | Variation de la rhéologie des mortiers en fonction du rapport E/C . . . . .            | 93         |
| IV.3       | Conclusions . . . . .  | 102        |
| <b>III</b> | <b>Simulation numérique</b>  | <b>105</b> |
| <b>V</b>   | <b>Simulation numérique</b>  | <b>107</b> |
| V.1        | Introduction . . . . .   | 107        |
| V.2        | Simulation d'écoulement des pâtes de ciment en 2D . . . . .                            | 109        |
| V.2.1      | Introduction . . . . .   | 109        |
| V.2.2      | Résultats numériques . . . . .   | 112        |
| V.2.3      | Observations visuelles de la variation de la teinte des pâtes de ciment . . . . .      | 119        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| V.3       | Mise en place d'un mur en pâte de ciment . . . . .          | 120        |
| V.3.1     | Introduction . . . . .                                      | 120        |
| V.3.2     | Observations . . . . .                                      | 121        |
| V.4       | Conclusions . . . . .                                       | 123        |
| <b>VI</b> | <b>Conclusions générales et perspectives</b>                | <b>125</b> |
| <b>IV</b> | <b>Annexe</b>   | <b>133</b> |
| <b>A</b>  | <b>Colorimétrie</b>   | <b>137</b> |
| A.1       | Définition . . . . .  | 137        |
| A.2       | Interaction lumière–matière . . . . .                       | 137        |
| A.2.1     | Réflexion . . . . .   | 138        |
| A.2.2     | Diffusion de la lumière par une surface rugueuse . . . . .  | 138        |
| A.3       | L'oeil humain . . . . .                                     | 138        |
| <b>B</b>  | <b>Traitement de données par la méthode de Gauss-Newton</b> | <b>140</b> |
| <b>C</b>  | <b>Défauts des surfaces des parements</b>                   | <b>141</b> |
| C.1       | Défauts liés à la texture des bétons . . . . .              | 141        |
| C.2       | Défauts liés à la couleur . . . . .                         | 144        |
| <b>D</b>  | <b>Matériau cimentaire</b>                                  | <b>149</b> |
| D.1       | Introduction . . . . .                                      | 149        |
| D.2       | Ciment . . . . .  | 149        |
| D.3       | Type de ciments . . . . .                                   | 149        |
| D.4       | Constituants du ciment . . . . .                            | 150        |
| D.5       | Granulats . . . . .   | 152        |
| D.6       | Les adjuvants . . . . .                                     | 152        |
| D.7       | Hydratation du ciment . . . . .                             | 152        |
| D.8       | Définitions [NF EN 206-1/CN] . . . . .                      | 153        |
| <b>E</b>  | <b>Rhéologie</b>  | <b>154</b> |
| <b>F</b>  | <b>Vibration du béton</b>                                   | <b>156</b> |
| F.1       | Rôle de la vibration . . . . .                              | 156        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| F.2      | Distance entre vibreurs . . . . .                                     | 156        |
| F.3      | Temps idéal de vibration . . . . .                                    | 157        |
| F.4      | Zone de vibration efficace . . . . .                                  | 157        |
| <b>G</b> | <b>Essais préliminaires</b>   | <b>159</b> |
| G.1      | Études des défauts de surface des parements bruts du béton . . . . .  | 159        |
| G.2      | Variation du rapport E/C sur deux couches . . . . .                   | 162        |
| G.3      | Effet de temps d'attente entre 2 levées . . . . .                     | 164        |
| G.4      | Temps de vibration optimal pour les bétons . . . . .                  | 166        |
| G.5      | Effet de la quantité de l'huile de décoffrage sur la teinte . . . . . | 167        |
| G.6      | Visite au chantier . . . . .  | 168        |
| G.7      | Mesure des états de surface . . . . .                                 | 171        |

# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| I.1  | Parements bruts de décoffrage (Izoret, 2014) . . . . .   | 8  |
| I.2  | Classifications des défauts des parements (Geoffray, 2004) . . . . .   | 9  |
| I.3  | Photographies d'une surface tachetée avant (gauche) et après l'enlèvement de 200 $\mu\text{m}$ de surface (droite)(Strehlein and P., 2008) . . . . .   | 10 |
| I.4  | Différents aspects du béton suivant les coupes effectuées plus ou moins loin de la surface de démoulage (Vénaut, 1989) (gauche) et variations de la composition et de propriété de la peau de béton (Kreijger, 1984)(droite) . . . . . | 11 |
| I.5  | Peau du béton et son coeur. 1) pâte de ciment, 2) mortier 3) béton de surface et le coeur du béton . . . . .   | 11 |
| I.6  | Variation de la couleur de béton en fonction de la couleur du ciment (Pigments, 2017) . . . . .  | 13 |
| I.7  | Variation de la couleur selon le type de ciment : (a) selon (Izoret, 2014) et (b) selon (Strehlein and P., 2008) . . . . .   | 13 |
| I.8  | Effet du rapport E/C sur la teinte du parement : A) E/C=0.55 en bas, et E/C=0.50 en haut (Trub, 1973) et B) E/C=0.45 en bas, et E/C=0.40 en haut (Izoret, 2014) . . . . .  | 14 |
| I.9  | Variation de la clarté de la peau du béton en fonction de la teneur en fer (Izoret, 2014) . . . . .  | 15 |
| I.10 | Observations au MEB en électrons secondaires de la surface d'une corniche de pont : (a) zone claire et (b) zone sombre (Lallement, 2001) . . . . .   | 16 |
| I.11 | Aspect de surface de l'échantillon de la semelle au stéréomicroscope (Lallement, 2001) . . . . .   | 16 |
| I.12 | rugosité en fonction de rapport E/C (Izoret, 2014) . . . . .   | 16 |
| I.13 | Influence du type de coffrage et de la rugosité de coffrage sur la surface du béton (Martin, 2007) . . . . .   | 17 |
| I.14 | Influence du type de l'huile de coffrage sur la couleur de la surface du béton à partir d'un coffrage métallique : émulsion (gauche) et cire minérale (droite) (Lallement, 2001) . . . . .   | 18 |
| I.15 | Influence du type de l'huile de coffrage sur la surface du béton à partir d'un coffrage en bois peint (Martin, 2007) . . . . .   | 18 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| I.16  | Effet de la quantité d’huile de démoulage sur l’aspect de parement (Chemical, 2018) . . . . .  | 19 |
| I.17  | Exemples d’une sous-vibration (gauche) et sur-vibration (droite) . . . . .   | 20 |
| I.18  | Effet des conditions atmosphériques sur l’aspect du parement (Strehlein and P., 2008) . . . . .  | 21 |
| II.1  | Thermogramme schématique d’hydratation du ciment montrant cinq étapes distinctes dans le processus d’hydratation. (Jolicoeur and Simard, 1998) . . . . .   | 25 |
| II.2  | Représentation schématique de la taille minimale de l’agglomérat. (a) la situation normale, (b) les cols solides sont formés par les aluminates de calcium (c) les aiguilles de gypse précipitent dans l’espace poreux. . . . .  | 27 |
| II.3  | Réseau de particules de ciment en interaction pendant la période dormante (a) fin du mélange, (b) Quelques secondes après la fin du mélange, (c) ponts de CSH formant un réseau rigide percolé dans le matériau, (d) Le module d’élasticité du mélange augmente à mesure que la taille des ponts CSH (points noirs et blancs) augmente (Roussel, 2012) . . . . . | 27 |
| II.4  | Pont de CSH entre deux grains de ciment (Roussel, 2012) . . . . .  | 28 |
| II.5  | Contrainte en fonction de la déformation pour une pâte de ciment mesurée avec une vitesse de déformation faible (Roussel et al., 2012) . . . . .   | 28 |
| II.6  | Fluides newtonien et non newtonien . . . . .   | 30 |
| II.7  | (a) Variation de la viscosité de différents matériaux (b) variation de la viscosité d’un système thixotropique sous l’influence d’une contrainte de cisaillement maintenue constante (Kaci, 2008) . . . . .  | 31 |
| II.8  | a) Contrainte de cisaillement et b) Viscosité apparente vs taux de cisaillement pour différents modèles classiques avec différents paramètres : $\tau_0 = 5$ , $\mu=0.5$ , $\mathbf{n} = 0.75$ et $K=2$ . . . . .  | 33 |
| II.9  | Modèle de Bingham-Papanastasiou pour différentes valeurs de $m$ , avec : $\tau_0 = 5$ et $\mu=0.5$ . . . . .   | 34 |
| II.10 | Modèle de Casson-Papanastasiou pour différentes valeurs de $m$ avec : $\tau_0 = 5$ et $\mu=0.5$ . . . . .  | 34 |
| II.11 | Modèle de Herschel Bulkley-Papanastasiou pour différentes valeurs de $m$ avec : $\tau_0 = 5, \mathbf{n} = 0.75$ et $K=2$ . . . . .   | 35 |
| II.12 | Exemple de variation d’affaissement et du seuil de cisaillement du mortier et du béton avec les changements dans la date de production du ciment (Wallevik et al., 2015) . . . . .   | 36 |
| II.13 | Présentation des rheographes seuil de cisaillement vs viscosité des pâtes de ciment, mortiers et bétons : avec l’ajout de SP (gauche) et effet de la forme des granulats et la quantité de sable (droite) (Haraldsson and Elvar, 2011). . . . .  | 37 |
| II.14 | a) Effet du rapport E/C sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons frais. b) Effet de l’eau, l’air et le plastifiant sur le seuil et la viscosité des mortiers (Haraldsson and Elvar, 2011). . . . .  | 38 |

|  |    |
|--|----|
| II.15 Influence du type de malaxeur sur la rhéologie de béton (Haraldsson and Elvar, 2011) . . . . .   | 39 |
| II.16 Viscosité plastique en fonction du taux de pré-cisaillement pour différentes techniques de mélange (David A. Williams, 1998). . . . .  | 39 |
| II.17 Comparaison des seuils d'écoulement (a) et de la viscosités (b) mesurées avec différents type de rhéomètres (Banfill, 2006) . . . . .  | 40 |
| II.18 cône d'Abrams . . . . .  | 41 |
| II.19 Boite en L . . . . .   | 42 |
| II.20 Essai d'étalement : démoulage (gauche) et mesure des diamètres (droite) . . . . .  | 42 |
| II.21 Rhéomètres à rotation : a) Plan-Plan, b) Cône-Plan et c) Couette (Roussel, 2012) . . . . .   | 43 |
| II.22 Rhéomètre à rotation : vane ou à ailette . . . . .   | 45 |
|  |    |
| III.1 Diffusion, absorption et transmission d'une lumière incident . . . . .   | 51 |
| III.2 Spectrocolorimètre Minolta CM508i (ATILH) . . . . .  | 51 |
| III.3 Représentation de la surface spécifique mesurée ( $S_m$ ) et de la surface géométrique ( $S_g$ ) . . . . .   | 52 |
| III.4 Microscope numérique "Keyence" au LMT-Cachan . . . . .   | 52 |
| III.5 Variation de la couleur selon le type de ciment : CEM I, CEM II et CEM III . . . . .   | 54 |
| III.6 Variation de la teinte de la surface coffrée des pâtes de ciment avec différents rapport E/C après 28 jours . . . . .  | 55 |
| III.7 Variation de la taille de pores dans les pâtes selon le rapport E/C : (a) P030, (b) P035, (c) P040, (d) P045 et (e) P050 . . . . .   | 56 |
| III.8 Variation de la clarté moyenne (6 mesures) en fonction du rapport E/C et du temps d'hydratation . . . . .  | 57 |
| III.9 Variation de la clarté moyenne en fonction du rapport E/C après 28 jours . . . . .   | 57 |
| III.10 Images 2D des surfaces des pâtes avec un agrandissement de 500x (taille : 1462 * 1097 $\mu m^2$ ) : (a) P030, (b) P035, (c) P040, (d) P045 et (e) P050 . . . . .                              | 59 |
| III.11 Images 3D des surfaces des pâtes avec un agrandissement de 500x (taille : 1462 * 1097 $\mu m^2$ ) : (a) P030, (b) P035, (c) P040, (d) P045 et (e) P050 . . . . .                              | 60 |
| III.12 Variation de la rugosité moyenne en fonction du rapport E/C de pâtes de ciment. Où $S_m$ est la surface mesurée, $S_g$ est la surface géométrique et $R_s$ est la surface développée. . . . . | 61 |
| III.13 Variation de la teinte des mortiers selon leur rapport E/C après 28 jours . . . . .   | 63 |
| III.14 Variation de la taille de pores dans les mortiers selon le rapport E/C : (a) M040, (b) M045, (c) M050, (d) M055 et (e) M060 . . . . .   | 64 |
| III.15 Variation de la clarté moyenne en fonction du rapport E/C et le temps d'hydratation . . . . .   | 65 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| III.16 | Variation de la clarté moyenne des mortiers à 28 jours de démoulage, en fonction du rapport E/C . . . . .   | 65 |
| III.17 | Variation des surfaces des mortiers selon le rapport E/C avec un agrandissement de 200x : (a) M040, (b) M045, (c) M050 (d) M055 et (e) M060 . . . . .   | 66 |
| III.18 | Image 3D de l'état de surface des mortiers selon le rapport E/C : (a) M040, (b) M045, (c) M050 (d) M055 et (e) M060 . . . . .   | 67 |
| III.19 | Variation de la rugosité moyenne en fonction du rapport E/C de mortiers . . . . .   | 68 |
| III.20 | Variation de la clarté moyenne des pâtes et des mortiers en fonction du rapport E/C . . . . .   | 69 |
| III.21 | Variation de la rugosité moyenne des pâtes et des mortiers en fonction du rapport E/C . . . . .   | 69 |
| III.22 | Variation de la clarté en fonction de la rugosité . . . . .   | 70 |
| IV.1   | Variation de la masse volumique expérimentale des pâtes de ciments . . . . .  | 74 |
| IV.2   | Variation de la concentration volumique solide des pâtes de ciment . . . . .  | 75 |
| IV.3   | Distance entre particules en fonction : (a) du rapport E/C et (b) de la concentration volumique de solides . . . . .  | 76 |
| IV.4   | Force de dispersion attrayante en fonction de la distance entre particules . . . . .  | 77 |
| IV.5   | Présentation de l'équipement : (a) Rhéomètre RheolabQC et (b) Géométries . . . . .  | 78 |
| IV.6   | Présentation des protocoles pour les essais rhéologiques de pâtes de ciment : a) Sans pré-cisaillement et b) avec pré-cisaillement. . . . .   | 79 |
| IV.7   | L'influence du pré-cisaillement pour les pâtes de ciment P050 avec pré cisaillement et sans pré cisaillement . . . . .  | 79 |
| IV.8   | Influence du type géométrie sur la courbe d'écoulement des pâtes P050 : 6 lames, vane et cylindrique. . . . .   | 80 |
| IV.9   | Variation du comportement rhéologiques des pâtes de ciment en fonction du temps d'hydratation : (a) P050 et (b) P060 . . . . .  | 81 |
| IV.10  | Courbe rhéologique d'une pâte de ciment P050 et les zones d'écoulement . . . . .  | 82 |
| IV.11  | Comportement rhéologique des pâte de ciment (P030, P035, P040, P045, P050, P055 et P060) déterminés à partir des lois classiques : (a) Bingham, (b) Casson et (c) Herschel Bulkley . . . . .  | 84 |
| IV.12  | Variation selon le rapport E/C : (a) du seuil de cisaillement et (b) de la viscosité à partir des modèles classiques . . . . .  | 85 |
| IV.13  | Comportement rhéologique des pâtes de ciment (P030, P035, P040, P045, P050, P055 et P060) déterminés à partir des lois modifiés par Papanastasiou : (a) Bingham Papanastasiou, (b) Casson Papanastasiou et (c) Herschel Bulkley Papanastasiou . . . . . | 87 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| IV.14    | Présentation de différents paramètres obtenu avec les modèles modifiés selon le rapport E/C : (a) Variation du seuil de cisaillement et (b) Variation de la viscosité . . . . .  | 88  |
| IV.15    | Variation du paramètre $m$ en fonction du rapport E/C selon les modèles modifiés   | 88  |
| IV.16(a) | Force de dispersion (F/A) et la valeur de "m", et (b) valeur de paramètre A en fonction de la distance entre particules . . . . .  | 90  |
| IV.17    | Force de dispersion (F) et la valeur de "m" en fonction de la distance entre particules . . . . .  | 90  |
| IV.18    | Variation de la masse volumique expérimentale des pâtes de ciment et des mortiers . . . . .  | 92  |
| IV.19    | Présentation de l'équipement : (a) Rhéomètre RheoCAD 500 chez Cerib-Épernon (b) Geometrie Vane . . . . .   | 92  |
| IV.20    | Protocole d'essai utilisé pour les mortiers . . . . .  | 93  |
| IV.21    | Courbe d'écoulement des 2 mortiers de type M050 et les zones d'écoulement  | 94  |
| IV.22    | Différentes courbes rhéologiques des mortiers M045, M050, M055 et M060 . .   | 94  |
| IV.23    | Comportement rhéologique des mortiers déterminés à partir des lois classiques : (a) Bingham, (b) Casson et (c) Herschel Bulkley . . . . .  | 96  |
| IV.24    | Variation selon le rapport E/C : (a) du seuil de cisaillement et (b) de la viscosité   | 97  |
| IV.25    | Comportement rhéologique des mortiers déterminés à partir des lois des modèles de Papanastasiou : a) Bingham Papanastasiou, b) Casson Papanastasiou et c) Herschel Bulkley Papanastasiou . . . . .                           | 99  |
| IV.26(a) | Données aberrantes pour le mortier M045 et (b) les écarts types obtenues dans le M050 . . . . .  | 100 |
| IV.27    | Variation selon le rapport E/C : (a) du seuil de cisaillement et (b) de la viscosité à partir des modèles modifiés . . . . .   | 100 |
| IV.28    | Variation du paramètre $m$ en fonction du rapport E/C selon les différents modèles modifiés . . . . .  | 101 |
| V.1      | Classification du modèle : modèle CFD (ci-dessus) et modèle de particules (ci-dessous) <b>Vasilic (2014)</b> . . . . .   | 108 |
| V.2      | Simulation numérique d'essais d'écoulement d'affaissement par : A) approche homogène (fluide unique) et B) approche hétérogène (suspension) ( <b>Dufour, 2002</b> ) . . . . .  | 109 |
| V.3      | Moule en plexiglas de 16cm de largeur et 17cm de hauteur . . . . .   | 110 |
| V.4      | Angle de contact entre une goutte d'eau avec une surface solide, où $\gamma_{SV}$ , $\gamma_{SL}$ et $\gamma_{LV}$ sont respectivement les tensions superficielles solide/vapeur, solide/liquide et liquide/vapeur . . . . . | 111 |
| V.5      | Présentation de la simulation numérique a) Géométrie de simulation d'écoulement des pâtes de ciment b) son maillage triangulaire d'une taille maximale de 0,25 cm avec 10486 éléments et 544 éléments de limite . . . . .    | 112 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| V.6  | Variation des courbes rhéologiques de pâtes : P040, P050 et P060 . . . . .  | 113 |
| V.7  | Ajustement de données expérimentales en utilisant le modèle de Bingham Papanastasiou pour une pâte de ciment P040 . . . . .   | 113 |
| V.8  | Écoulement de la pâte de ciment P040 après 1 seconde : (a) Simulation et (b) expérimentation . . . . .  | 114 |
| V.9  | Écoulement de la pâte de ciment P040 après 5 secondes : (a) Simulation et (b) expérimentation . . . . .   | 114 |
| V.10 | Réservoir de la moule en plexiglas avec le reste du matériaux de la pâte collée dans les parois dans la pâte P040 . . . . .   | 115 |
| V.11 | Ajustement de données expérimentales en utilisant la formule de Bingham Papanastasiou pour une pâte de ciment P050 . . . . .  | 115 |
| V.12 | Écoulement de la pâte de ciment P050 après 1 seconde : (a) Simulation et (b) expérimentation . . . . .  | 116 |
| V.13 | Écoulement de la pâte de ciment P040 après 2 secondes : (a) Simulation et (b) expérimentation . . . . .   | 116 |
| V.14 | Réservoir d'une moule en plexiglas avec le reste de matériaux de la pâte collés aux parois (P050) . . . . .   | 117 |
| V.15 | Ajustement de données expérimentales en utilisant le modèle de Bingham Papanastasiou pour une pâte de ciment P060 . . . . .   | 117 |
| V.16 | Écoulement de la pâte de ciment P060 après 0.5 seconde : (a) Simulation et (b) expérimentation . . . . .  | 118 |
| V.17 | Écoulement de la pâte de ciment P060 après 2 secondes : (a) Simulation et (b) expérimentation . . . . .   | 118 |
| V.18 | Réservoir de la moule en plexiglas avec le reste du matériaux de la pâte collée dans les parois dans la pâte P060 . . . . .   | 119 |
| V.19 | Variation de la teinte en fonction de rapport E/C : 0.40, 0.50 et 0.60 . . . . .  | 120 |
| V.20 | Présentation de la simulation numérique a) Géométrie de simulation d'écoulement des pâtes des ciment b) son maillage triangulaire d'une taille maximale de 1 cm avec 10486 éléments et 544 éléments de limite . . . . . | 121 |
| V.21 | Agrandissement de la géométrie du mur avec son maillage . . . . .   | 121 |
| V.22 | Écoulement de la pâte de ciment P050 après a) 5 secondes b) 10 secondes et c) 15 secondes . . . . .   | 122 |
| V.23 | Écoulement de la pâte de ciment P050 après a) 20 secondes b) 25 secondes et c) 30 secondes . . . . .  | 122 |
| A.1  | principe de la perception visuelle humaine . . . . .  | 137 |
| A.2  | Réflexion de la lumière dans une surface : (a) spéculaire et (b) diffuse . . . . .  | 138 |
| A.3  | Le spectre électromagnétique par longueur d'onde croissante . . . . .   | 139 |
| A.4  | La vision des couleurs et ses limites . . . . .   | 139 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| A.5  | Espace colorimétrique CIELab . . . . .  | 139 |
| C.1  | Phénomène de bullage (Blasting, 2018) . . . . .   | 141 |
| C.2  | Phénomène de ressuage (Geoffray, 1991) . . . . .  | 142 |
| C.3  | nid de gravier (Blasting, 2018) . . . . .   | 143 |
| C.4  | Vide de compaction dû à une sous-vibration (Grampeix, 2013) . . . . .   | 144 |
| C.5  | L'écaillage (Shea, 2018) . . . . .  | 144 |
| C.6  | Faïençage typique de la surface d'un pilier de béton (Wikipedia, 2016) . . . . .  | 145 |
| C.7  | Variation de la teinte dû au réemploi anarchique de panneaux de coffrage (Geoffray, 1991) . . . . .   | 145 |
| C.8  | Pommelage A) Positive et B) Négative (Society, 2013) . . . . .  | 146 |
| C.9  | Efflorescences dans les bétons (Blasting, 2018) . . . . .   | 147 |
| C.10 | Traces de rouille sur une surface de béton 7x7x28 cm <sup>3</sup> . . . . .   | 147 |
| C.11 | Taches noires sur la surface de béton (Geoffray, 1991) . . . . .  | 148 |
| E.1  | Écoulement d'un fluide en régime laminaire . . . . .  | 155 |
| E.2  | Schéma de glissement des couches . . . . .  | 155 |
| F.1  | Variation du seuil de cisaillement de la pâte de ciment en fonction de la distance pour : (a) 50 Hz et (b) 100 Hz . . . . .   | 158 |
| F.2  | Zone de vibration efficace pour une fréquence de : (a) 50 Hz et (b) 100 Hz . . . . .  | 158 |
| F.3  | Zone de vibration efficace en fonction de la fréquence à une puissance de : (a) 50 W et (b) 100 W . . . . .   | 158 |
| G.1  | Parements bruts de bétons fabriqués au laboratoire . . . . .  | 160 |
| G.2  | Défauts de surfaces dans les bétons liés à la texture de Parements bruts : (a)1 bullage, (a)2 écaillage, (a)3 faïençage, (b)4 nid du sable et (b)5 vide de compaction . . . . . | 160 |
| G.3  | Défauts de surfaces dans les bétons liés à la variation de la teinte : (a)1 sécrétion de chaux (b)2 taches noires . . . . .   | 161 |
| G.4  | Variation de la couleur des pâtes en fonction du rapport E/C dans un même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage . . . . .              | 162 |
| G.5  | Variation de la couleur des mortiers en fonction du rapport E/C dans un même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage . . . . .           | 163 |
| G.6  | Variation de la couleur des pâtes en fonction du temps d'attente dans un même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage . . . . .          | 164 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| G.7  | Variation de la couleur des mortiers en fonction du temps d'attente dans une même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage . . . . . | 165 |
| G.8  | Variation de la surface des bétons en fonction du temps de vibration . . . . .   | 166 |
| G.9  | Variation de la couleur des pâtes en fonction de la quantité de huile de démoulage : (a) Huilé avec de papier d'essayage et (b) huilé avec une brosse . . . . .            | 167 |
| G.10 | Variation de la couleur des mortiers en fonction de la quantité de huile de démoulage : (a) Huilé avec de papier d'essayage et (b) huilé avec une brosse . . . . .         | 168 |
| G.11 | Poutre préfabriquée . . . . .  | 168 |
| G.12 | (a) Voile préfabriqué (b) Poteau . . . . .   | 169 |
| G.13 | (a) Dalles coulées sur place (b) Poteau coulé sur place . . . . .  | 169 |
| G.14 | (a) Surface coffrée avec un l'excès d'huile de démoulage (b) Surface coffrée recommandée avec d'huile de démoulage . . . . .   | 170 |
| G.15 | Paramètres de profil de l'état de surface . . . . .  | 171 |
| G.16 | (a) Surface coffrée d'une pâte de ciment (E/C=0.40) (b) 1 et 2 représentent les points de mesure de rugosité et de clarté . . . . .  | 171 |
| G.17 | Image 3D des surfaces de la pâte de ciment (a) zone claire (b) zone sombre . . . . .   | 172 |
| G.18 | Profil des surfaces de la pâte de ciment (a) zone claire (b) zone sombre . . . . .   | 172 |

# Liste des tableaux

|       |   |    |
|-------|---|----|
| I.1   | Échelle de référence définissant les 7 niveaux de gris avec : $L^*$ , c'est la clarté, $a^*$ et $b^*$ sont ces coordonnées de chromacité (Lallement, 2001) . . . . .                  | 12 |
| I.2   | Dosage de ciment en fonction de la dimension maximale des granulats (Vénaut, 1989) . . . . .  | 13 |
| I.3   | Paramètres influençant sur la variation de la teinte . . . . .  | 22 |
| II.1  | Différents modèles pour décrire la viscosité des suspensions concentrés . . . . .   | 24 |
| II.2  | concentration ionique pour deux suspensions de ciment comme rapporté par Yang. et al. La force ionique est 266.3 et 268.9 mM (Flatt, 2001) . . . . .                                  | 26 |
| II.3  | Propriétés rhéologiques de matériaux cimentaires (Banfill, 2006) . . . . .  | 29 |
| II.4  | Paramètres du béton frais selon le modèle de Bingham et le modèle de Herschel Bulkley ( $\mu^*$ Viscosité plastique équivalent) (Larrard et al., 1998) . . . . .                      | 32 |
| III.1 | Valeurs de la clarté et de paramètres chromatiques dans l'espace CIELab . . . . .   | 50 |
| III.2 | Grossissements selon l'objectif zoom à large plage VH-Z100R/Z100T à haute résolution du microscope numérique Keyence . . . . .  | 52 |
| III.3 | Composition chimique du ciment CEM I . . . . .  | 53 |
| III.4 | Composition des pâtes de ciment . . . . .   | 53 |
| III.5 | Temps de vibration pour les pâtes de ciment selon leur rapport E/C . . . . .  | 54 |
| III.6 | Valeur moyenne des surfaces développées ( $R_s$ ) des pâtes de ciment. . . . .  | 61 |
| III.7 | Composition des mortiers . . . . .  | 61 |
| III.8 | Temps de vibration pour les échantillons des mortiers selon leur rapport E/C . . . . .  | 62 |
| III.9 | Surfaces développées des mortiers ( $S_r$ ) en fonction du rapport E/C. Où $S_m$ est la surface mesurée, $S_g$ est la surface géométrique et $R_s$ est la surface développée. . . . . | 68 |
| IV.1  | Composition des pâtes de ciment . . . . .   | 74 |
| IV.2  | Masse volumique expérimentale des pâtes de ciments . . . . .  | 74 |
| IV.3  | Paramètres rhéologiques obtenues para la régression numérique de Gauss-Newton en fonction des différents modèles classiques . . . . .   | 83 |

|  |     |
|--|-----|
| IV.4 Paramètres rhéologiques obtenues para la régression numérique de Gauss-Newton en fonction des différents modèles modifiés . . . . . | 86  |
| IV.5 Paramètres rhéologiques des pâtes de ciment selon la méthode de Bingham Papanastasiou . . . . .                                     | 89  |
| IV.6 Composition des mortiers . . . . .  | 91  |
| IV.7 Masse volumique des mortiers . . . . .  | 91  |
| IV.8 Propriétés rhéologiques des mortiers selon les modèles classiques . . . . .   | 95  |
| IV.9 Propriétés rhéologiques des mortiers en fonction des modèles modifiés . . . . .   | 98  |
| IV.10 Paramètres rhéologiques du mortier selon la méthode de Bingham et Bingham-Papanastasiou . . . . .                                  | 102 |
|  |     |
| D.1 Types de ciments . . . . .   | 150 |
| D.2 Composition chimique du ciment portland (Neville, 2000) . . . . .  | 150 |
| D.3 Principales phases du clinker (Aïtcin, 2016) . . . . .   | 150 |
| D.4 Granulats les plus utilisés . . . . .  | 152 |
|  |     |
| G.1 Composition des bétons . . . . .   | 159 |
| G.2 Variation du rapport E/C des pâtes et des mortiers . . . . .   | 162 |
| G.3 Composition des bétons . . . . .   | 166 |
| G.4 Valeurs de clartés et de paramètres de rugosités des zones sombres et claires. . . . .   | 172 |

# Remerciements

Le présent travail a été réalisé à l'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics, du bâtiment et de l'industrie (ESTP-Paris). Il s'inscrit dans le cadre d'une nouvelle chaire : Ingénierie des Bétons (IdB).

Je remercie tout particulièrement ma directrice de thèse, Madame Jena JEONG. Les conseils et les orientations qu'elle a donnés m'ont permis de mener jusqu'au terme cette thèse. La confiance qu'elle m'a accordée, et surtout la patience dont elle a fait preuve à mon égard m'ont aidé à évoluer et à m'accomplir en tant que chercheur. Mes premiers remerciements s'adressent aussi à Madame Sandrine MANSOUTRE, Directrice de l'Ecole Française du Béton (EFB), qui a largement contribué à mes recherches par ses conseils avisés. Sans elle, ma production de thèse n'aurait pas été la même.

Je remercie également Monsieur Eric CROQUESEL, Directeur de l'IRC. Lequel m'a permis d'intégrer le centre de recherche et de travailler dans un environnement propice à mes travaux.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury :

- Tout d'abord, à Messieurs Ali-Nordine LEKLOU, et Christophe LANOS, pour avoir accepté de rapporter cette thèse et pour les remarques pertinentes qu'ils ont apportées au manuscrit.
- Ensuite, à Monsieur Horacio COLINA, Directeur du pôle Recherche de l'ATILH. Par ses conseils et son soutien permanent, il a favorisé le bon déroulement de mon travail.
- A Monsieur Abdelhak KACI, pour les échanges et les réunions de travail qui ont cadencées ces trois années. Et surtout pour tous les conseils concernant la rhéologie de matériaux cimentaires.
- Pour finir, à Monsieur Farid BENBOUDJEMA, pour m'avoir accueilli au sein de LMT-Cachan, me permettant ainsi de réaliser les essais de rugosités des matériaux dans des conditions optimales et pour avoir accepté d'examiner mon travail de thèse.

Je souhaite remercier toutes les personnes m'ayant aidé au cours de ces trois années :

- Monsieur Patrick ROUGEAU pour m'avoir permis d'effectuer mes essais expérimentaux de rhéologies de mortiers chez CERIB.
- Monsieur Laurent IZORET, Directeur Délégué Produits et Applications chez ATILH, pour m'avoir permis d'initier la thèse et de m'avoir encadré dans ses débuts.

Je remercie également Messieurs Justin DIRRENBERGER et Éric STORA pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de mon travail, et pour leur présence lors de ma soutenance.

Enfin, je remercie chaleureusement l'ensemble de l'équipe l'IRC ainsi que tous les doctorants pour leur soutien et leur amitié pendant toute la durée de ma thèse

Sans oublié ma famille, laquelle m'a soutenu dans cette étape importante de ma vie professionnelle, et de ma future carrière de chercheur.

## Résumé

Au cours des dernières années, la technologie du béton progresse très rapidement, notamment pour améliorer l'apparence de sa surface. Cette amélioration permet non seulement de rendre l'aspect plus esthétique, mais le protège également contre les agressions provenant de l'environnement. La surface du béton brut présente généralement de nombreux défauts de surface. Ces défauts sont visibles à l'œil nu par des variations de couleur ou de texture. Dans la littérature, l'un des paramètres déterminant de la variation de la teinte et de la rugosité est le rapport E/C de formulation. Cependant, les avis concernant son influence sont divergents. Par exemple, certains considèrent que l'augmentation de l'eau génère l'éclaircissement des surfaces du béton, alors que d'autres ont observé des résultats opposés. Il en va de même en ce qui concerne la variation de la rugosité. L'aspect final de la surface du béton peut être aussi influencée par sa mise en place à l'état frais. Ainsi un matériaux à faible ouvrabilité provoquerait des hétérogénéités dans les surfaces.

Mon travail de thèse prévoit : premièrement, à travers des essais expérimentaux sur les pâtes et les mortiers, de ratifier ou de réfuter les résultats concernant la variation de la teinte et de la rugosité en fonction du rapport E/C. Deuxièmement, déterminer la variation des propriétés rhéologiques à l'état frais (seuil et viscosité) en fonction du rapport E/C. Pour finalement faire un lien entre rhéologie et état de surface dans les matériaux cimentaires.

Nous avons utilisé un spectre colorimètre pour mesurer l'intensité de la lumière réfléchie et un microscope numérique pour mesurer la rugosité des surfaces. Les résultats de nos essais expérimentaux confirment que l'augmentation de la quantité d'eau et la réduction de la rugosité des surfaces génèrent un éclaircissement dans les matériaux cimentaires. Concernant les essais rhéologiques, nous avons observé que l'augmentation de l'eau de formulation engendre la diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité.

Pour décrire le comportement rhéologique des matériaux cimentaires selon la variation de rapport E/C, les modèles classiques (Bingham, Herschel Bulkley et Casson) et modèles modifiés par Papanastasiou ont été utilisés. A partir de la régression numérique, nous avons observé que la loi de Herschel Bulkley et tous les autres modèles modifiés sont bien adaptés pour décrire le comportement des pâtes de ciment. Pour les mortiers, les modèles Bingham, Herschel Bulkley et tous les modèles modifiés sont bien adaptés.

Enfin, la loi de Bingham-Papanastasiou a été choisie pour modéliser l'écoulement des pâtes de ciment via COMSOL multiphysics. Les résultats numériques sont comparés avec ceux d'expérimentation.

Mots-clés : Rhéologie, pâte de ciment, mortier, clarté, rugosité, simulation numérique.

# Introduction

Le parement est la face d'un élément de construction. Il doit résister aux diverses agressions auxquelles est soumise une structure pendant sa durée de service. La variation de la couleur dans les parements peut être liée à la présence de défauts de surface. Un parement brut de béton peut présenter plusieurs types de défaut de surface, que l'on peut observer à travers les variations de couleur et de texture qui caractérisent l'homogénéité de la surface. Ces défauts peuvent être dus : au dosage de la formulation (sable, ciment, eau, etc.), au procédé de mise en place (coffrage, pompage, vibration, etc.) mais aussi aux conditions de stockage (température et humidité relative). Dans tous les cas, ces défauts auront tendance à entraîner des problèmes de protection ou de dégradation d'ordre visuel. Par conséquent, l'étude des propriétés rhéologiques et leur lien avec l'aspect de la surface de matériaux cimentaires à l'état durci pourrait non seulement être un des éléments clés pour résoudre le problème de l'homogénéité de la surface mais aussi les éléments de bases pour la construction par l'impression 3D. Ma démarche et mes résultats sont présentés dans la thèse en 5 chapitres :

- I Parements bruts de décoffrage.
- II Rhéologie des matériaux cimentaires.
- III Variation de la teinte et de la rugosité des surfaces des matériaux cimentaires.
- IV Rhéologie expérimentale des matériaux cimentaires.
- V Simulation numérique.

Au chapitre I nous présentons les principaux défauts de surfaces dans le parement et notamment les défauts liés à la variation de la teinte, l'importance de connaître la fonction de la peau de béton et les principaux paramètres influencent de l'aspect des parement bruts.

Au chapitre II nous présentons les principales lois de comportement des bétons frais telles que les lois classiques et les lois modifiées par Papanastasiou, pour finalement aborder les paramètres influençant la rhéologie du béton frais.

Au chapitre III, nous présentons les résultats des essais sur la variation de la clarté et la rugosité en fonction du rapport E/C. Ce travail s'appuie sur des échantillons de pâtes de ciment et de mortiers ayant différents rapport E/C :

- *Pâte de ciment* : 0.30(P030), 0.35(P035), 0.40(P040), 0.45(P045) et 0.50(P050)
- *Mortier* : 0.45(M045), 0.50(M050), 0.55(M055) et 0.60(M060)

Le type de ciment utilisé pour nos essais sera toujours le ciment de type I. Ceci pour deux raisons : la première parce que c'est le ciment le plus utilisé et nos observations faites à partir de la littérature s'appuient exclusivement sur ce type de ciment ; la seconde, parce que notre objectif de travail n'est pas étudier l'influence du ciment sur l'apparence du parement

de béton, mais l'influence de la quantité d'eau de la composition sur la paroi du béton. Nous considérons ainsi inutile d'utiliser plusieurs types de ciment.

Nous présentons notre démarche de mesure de la variation de la clarté et de la rugosité à partir d'un spectrocolorimètre et un microscope numérique, depuis le jour du démoulage jusqu'à 28 jours. Nos observations, nous conduisent à penser que la variation du rapport E/C a une influence sur la différence de teinte dans les matériaux cimentaires. D'une part, la variation de la clarté est directement proportionnelle au rapport E/C et inversement proportionnelle à la rugosité. D'autre part, elle varie en fonction du temps.

Au chapitre IV nous présentons les essais rhéologiques réalisés sur les matériaux cimentaires frais, pour déterminer leur propriétés rhéologiques. Ce travail s'appuie sur des échantillons de pâtes de ciment et de mortiers ayant différents rapport E/C :

- *Pâte de ciment* : 0.30(P030), 0.35(P035), 0.40(P040), 0.45(P045), 0.50(P050), 0.55(P055) et 0.60(P060)
- *Mortier* : 0.45(M045), 0.50(M050), 0.55(M055) et 0.60(M060)

Nous avons utilisé un viscosimètre disponible au laboratoire IRC-ESTP Paris pour les pâtes de ciment et un rhéomètre disponible chez CERIB-Epernon pour les mortiers. Nous avons observé et déterminé le seuil de cisaillement et la viscosité à travers 3 modèles classiques (Bingham, Casson et Herschel Bulkley) et 3 modèles modifiés par Papanastasiou (Bingham-Papanastasiou, Casson-Papanastasiou et Herschel Bulkley-Papanastasiou). Les seuils de cisaillement et la viscosité ont été déterminés/ajustés par la méthode numérique de Newton-Gauss avec Matlab. D'après nos résultats, nous avons observé une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité avec l'augmentation du rapport E/C pour les pâtes de ciment et les mortiers. En se basant sur les valeurs des coefficients de détermination, nous avons pu sélectionner les lois les plus adaptées pour décrire le comportement : les modèles les plus adaptés pour décrire le comportement des pâtes de ciment sont les modèles de Herschel Bulkley, de Bingham modifié et de Herschel Bulkley modifié. Les modèles les plus adaptés pour décrire le comportement du mortier sont les modèles de Bingham et de Herschel Bulkley. Mais cela reste pour les mortier fluides.

Dans le chapitre V, nous abordons sur la modélisation 2D d'un fluide. Dans notre cas, nous avons modélisé l'écoulement de la pâte de ciment à partir de la loi Bingham Papanastasiou à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (Computational Fluid Dynamics). Nous avons pris 3 types d'échantillon : P040, P050 et P060 pour la simulation.

La simulation de l'écoulement a été effectuée jusqu'à 10 secondes dans les moules de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  et 30 secondes pour un mur d'un mètre en pâte. Le calcul a été fait à l'aide du Cloud-ESTP Paris ayant une mémoire de 128 Gb avec 16 processeurs. Le temps de calcul est variable entre 7 et 14 heures selon le type de fluide, moule et rapport E/C simulé. Nous avons comparé le temps et la forme de remplissage des pâtes avec les essais expérimentales. A partir de ces résultats nous pouvons conclure que l'augmentation du rapport E/C entraîne une diminution du temps de remplissage et de la rugosité de la surface.

Finalement, nous avons pu établir la relation entre des propriétés rhéologiques (seuil et viscosité) de matériaux à l'état frais et l'aspect des surfaces de ces matériaux à l'état durci. Ainsi, nous avons vu que la diminution du seuil de cisaillement (dépendant du rapport E/C) entraîne l'éclaircissement des surfaces à l'état durci et également une diminution de la rugosité. Parallèlement, nous avons pu identifier les modèles les plus adaptés pour décrire le comportement rhéologique des pâtes et des mortiers.

Le paramètre  $m$  proposé par Papanastasiou permet de mieux décrire le comportement rhéologique d'une pâte de ciment, plus particulièrement le seuil de cisaillement sous forme d'une loi exponentielle. En considérant que la pâte de ciment est un colloïde, le paramètre pourrait être considéré comme un élément déterminant de l'équilibre des interactions attractive et répulsive entre l'eau et les particules anhydres. En augmentant les distances entre particules (augmentation du rapport E/C), ces forces physiques diminuent.



## Première partie

# RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

# Table des matières

---

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>I</b>  | <b>Parements bruts de décoffrage</b>  | <b>7</b>  |
| I.1       | Introduction . . . . .  | 7         |
| I.2       | Peau du béton et sa teinte . . . . .  | 9         |
| I.3       | Paramètres influençants la teinte des parements bruts . . . . .                   | 10        |
| I.3.1     | Composition du béton . . . . .  | 12        |
| I.3.2     | Minéralogie des surfaces . . . . .  | 14        |
| I.3.3     | Morphologie et rugosité des surfaces . . . . .                                    | 15        |
| I.3.4     | Surface du moule et produit de démoulage . . . . .                                | 17        |
| I.3.5     | Mise en place et compactage . . . . .   | 19        |
| I.3.6     | Temps de décoffrage et conditions climatiques . . . . .                           | 20        |
| I.4       | Conclusions . . . . .   | 21        |
| <b>II</b> | <b>Rhéologie des matériaux cimentaires</b>  | <b>23</b> |
| II.1      | Introduction générale . . . . .   | 23        |
| II.1.1    | Suspension . . . . .  | 23        |
| II.1.2    | Hydratation de la pâte de ciment . . . . .  | 24        |
| II.1.3    | Description physique du seuil . . . . .   | 28        |
| II.2      | Comportement rhéologique de matériaux cimentaires . . . . .                       | 29        |
| II.2.1    | Introduction . . . . .  | 29        |
| II.2.2    | Approche classique de comportement rhéologique . . . . .                          | 31        |
| II.2.3    | Approche modifiée par Papanastasiou . . . . .                                     | 33        |
| II.3      | Erreurs de mesure du comportement rhéologique des matériaux cimentaires . . . . . | 35        |
| II.4      | Paramètres influant sur la rhéologie du béton frais . . . . .                     | 37        |
| II.5      | Techniques de mesures expérimentales de l'écoulement . . . . .                    | 40        |
| II.6      | Conclusions . . . . .   | 45        |

---

# CHAPITRE I

## Parements bruts de décoffrage

Dans ce premier chapitre, nous commencerons par définir le terme "parement" en nous appuyant sur la littérature. Nous verrons comment la surface d'une construction en béton peut être considérée comme la peau de la construction, dont la composition est totalement différente et peut varier de la surface du béton au centre du béton. Cette peau, selon la littérature, sera celle qui définira finalement l'apparence du béton. Ensuite, nous listerons les facteurs qui pourraient influencer l'aspect du béton, lesquels sont généralement liés à la composition du béton utilisé, à sa mise en place et ses conditions de conservation après démoulage. Parmi tous les paramètres qui influent sur la clarté du béton, il existe deux paramètres dont l'étude conduit à des résultats différents selon les auteurs. Ce sont le rapport E/C et la rugosité. En raison de cette différence de résultats, mon travail sera d'abord de les affirmer ou de les réfuter à travers des essais expérimentaux sur des pâtes et des mortiers en utilisant un seul type de ciment (CEM I).

### I.1 Introduction

Le béton peut être considéré comme un fluide hétérogène qui contient du ciment, de l'eau, du sable et des granulats. L'apparence et la qualité de la surface des bétons dépendent des constituants du béton, de la formulation et la fabrication du béton, des conditions de maturation, du coffrage et des produits de démoulage, et des traitements de surface éventuels avant ou après démoulage. Plusieurs travaux de recherche ont permis de présenter un état des lieux des connaissances sur l'analyse des défauts d'aspect des parements de bétons issus des chantiers, sur les méthodes actuelles de contrôle de la qualité des parements et sur l'influence des paramètres de formulation. La démarche proposée dans ce travail de thèse peut être perçue comme une contribution complémentaire aux connaissances actuelles sur le rôle des variations d'eau à l'interface béton-coffrage.

Un parement (Figure I.1) est la face d'un élément de construction conçue pour rester apparente et qui peut faire l'objet de nombreux traitements mécaniques ou chimiques ([Infociments, 2016](#)). Il doit résister aux diverses agressions auxquelles est soumise la structure pendant sa durée de service et s'intégrer le plus naturellement possible dans son environnement ([CIMbeton, 2005a](#)). Le parement d'ouvrage est défini comme une surface vue par l'utilisateur (surface coffrée) et il constitue la peau de l'ouvrage qui est différent de son cœur. Normalement, les défauts de parements sont synonymes de la pauvreté de la qualité des bétons mis en oeuvre d'où l'importance de la maîtrise de la fabrication des bétons pour éviter

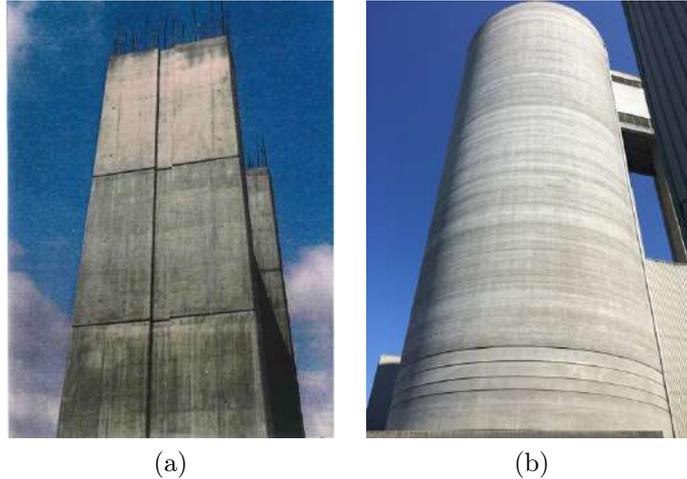


FIGURE I.1 – Parements bruts de décoffrage (Izoret, 2014)

ces anomalies. Le parement ou la peau du béton, peut accomplir deux fonctions : une fonction esthétique et une fonction protectrice.

Comme la surface du béton elle reste visible, elle est le visage du béton et intervient directement dans l'esthétique de l'ouvrage. La surface du béton brut de décoffrage est constituée d'une peau (peau du béton), qui est composée généralement des éléments fins (ciment et sables) qui enrobent les gros granulats (gravillons qui constituent le squelette du béton). Pour l'opinion publique le béton est considéré comme un matériau "dur mais laid", et à partir de cet avis, les fabricants se sont souvent contentés de n'importe quel résultat en considérant que les bétons sont forcément hétérogènes et qu'ils doivent être montrés comme tel pour affirmer son caractère. Dans un grand nombre de cas, les parements en béton seront prévus et gardés comme des parements bruts de décoffrage, certains parements peuvent être améliorés par différents traitements de surface utilisés comme support de revêtements spécifiques.

Le béton protège chimiquement et physiquement l'acier contre la corrosion (Jiang et al., 2018). Lorsque l'hydratation du ciment se produit, une solution interstitielle basique de pH élevé protège les armatures noyées dans le béton. En fonction du milieu environnemental ou les conditions climatiques auxquelles le béton est exposé, les épaisseurs d'enrobage peuvent varier pour augmenter la résistance à la pénétration des agents agressifs jusqu'à l'armature. Si l'épaisseur ou la résistance du béton d'enrobage qui est soumise à des dégradations, n'est pas suffisante, cela peut conduire facilement à la corrosion des armatures et donc à la dégradation de l'ouvrage. Finalement la dégradation diminuera sa durée de vie. L'une des origines de la corrosion des armatures est la diminution de pH due principalement au phénomène de la carbonatation, résultant de la pénétration du  $CO_2$  atmosphérique suite à une réaction acido basique. Le  $CO_2$  entraîne la transformation de la portlandite en carbonate de calcium. Une fois la surface de l'armature oxydée, elle provoque un gonflement faisant éclater le béton d'enrobage. Ainsi, la durée de vie d'un béton sous la corrosion induite par la carbonatation peut être prédite (Ferrer et al., 2016).

Selon la norme P18-503 et le Projet National CALIBE (Geoffray, 2004), les défauts des parements peuvent être caractérisés par trois critères : la planéité, la texture et la teinte (Figure I.2). Dans notre cas, nous allons nous concentrer sur l'étude des défauts liés à la variation de la teinte des surfaces, c'est-à-dire, la clarté et la rugosité.

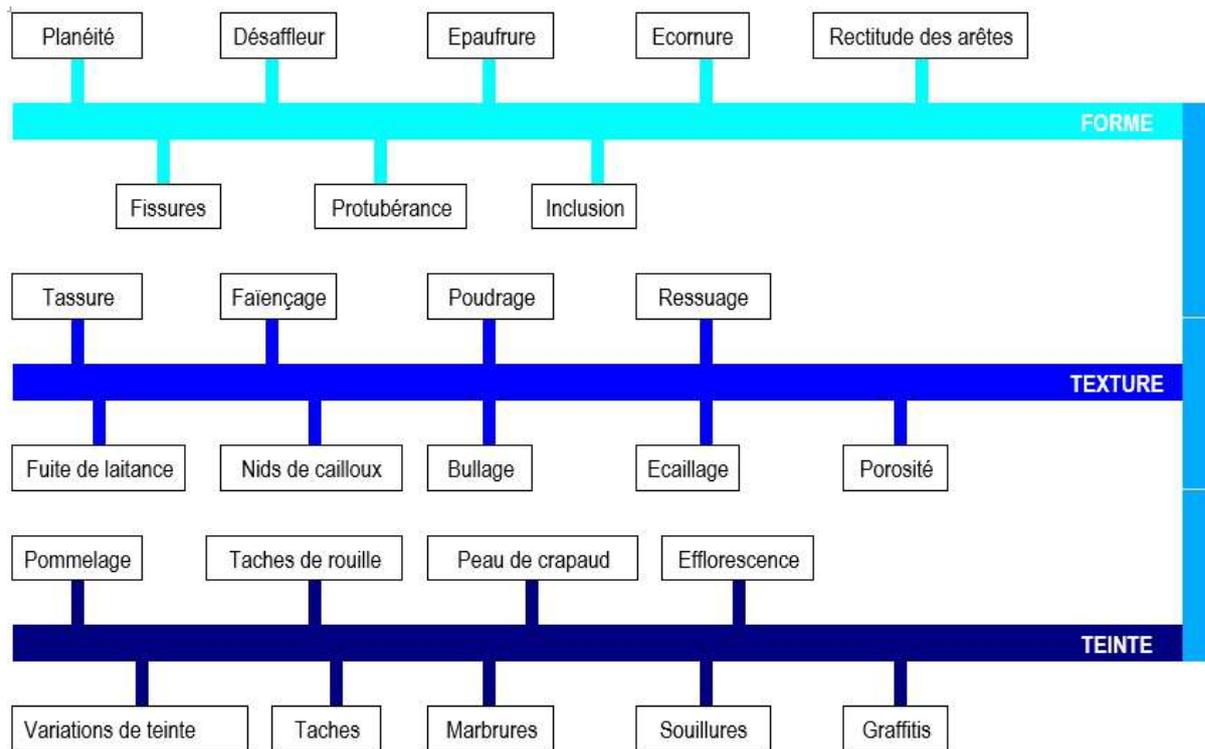


FIGURE I.2 – Classifications des défauts des parements (Geoffroy, 2004)

## I.2 Peau du béton et sa teinte

La teinte des surfaces des bétons est le résultat des phénomènes d'interactions entre la lumière et la surface du béton (absorption et diffusion des surfaces) qui dépendent des caractéristiques structurales de la surface du béton. La teinte du béton durci est généralement grise plus ou moins accentuée. La variation de couleurs dépend généralement du constituant du béton le plus fins (tel que les granulats fins ( $\leq 1\text{mm}$  (TFB, 1966) ou  $\leq 4\text{mm}$  (Vénaut, 1989)), le ciment, les additions minérales, les pigments utilisés), la quantité d'eau de formulation (Lallement, 2001) (TFB, 1966) (Trub, 1973), le type et la rugosité de coffrage (Martin, 2007), le type et la quantité d'huile utilisée (Lallement, 2001), le temps de vibration (Grampeix, 2013), et les conditions environnementales avant et après démoulage (Strehlein and P., 2008).

D'après Strehlin, les défauts d'aspect des bétons sont un phénomène de surface de béton (peau) qui est totalement différent au coeur du béton. Ainsi, si nous enlevons  $200\ \mu\text{m}$  de matériau de la surface d'un béton à l'aide d'une rectifieuse de précision, nous pouvons constater que l'aspect marbré était purement un phénomène de surface. La surface était plus uniforme en apparence après enlèvement de matériau (Figure I.3). Donc, la couleur de la surface de béton est déterminée par la peau du béton.

Pendant le bétonnage, le béton frais est coulé dans un moule donné. Le contact du béton frais avec la paroi du moule donne lieu à la formation d'un interface béton-coffrage. Les matériaux qui forment cette interface sont :

1. **Le coffrage** : Modèle en creux dans lequel nous coulons le béton, qui, après durcissement et retrait du coffrage, aura pris sa forme. Le béton reproduit tous les détails de la surface coffrante.

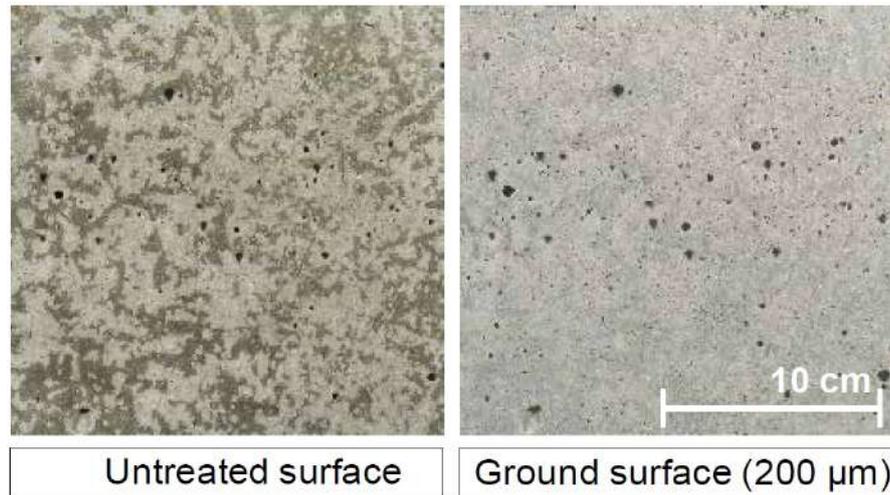


FIGURE I.3 – Photographies d’une surface tachetée avant (gauche) et après l’enlèvement de  $200\ \mu\text{m}$  de surface (droite)(Strehlein and P., 2008)

2. **Le démoulant** : Produit de décoffrage, anti-adhérent (huile minérale, résine, cire, etc) appliqué avant bétonnage sur la surface de coffrage qui est en contact avec le béton.
3. **Le béton** : Matrice cimentaire fluide constituée d’un squelette granulaire.

Le béton frais, étant un fluide hétérogène composé de granulats (de différentes tailles, formes et densités), de ciment et d’eau, est coulé dans un moule et compacté par vibration. La différence de densité va faire que les éléments lourds se sédimentent et provoque en même temps une remontée de l’eau qui transporte des bulles d’air et des particules fines (ressuage). Les particules fines du ciment et de sable vont adhérer à la paroi à cause de l’effet de la couche limite engendrée par l’écoulement de ces particules. Ainsi, l’adhérence des particules fines à la paroi détermine l’aspect final de la peau du béton durci (après l’évaporation d’eau). Selon (Lallement, 2001), 99% de la perception du parement est due aux premiers  $100$  à  $200\ \mu\text{m}$  de couche. Selon Kreijger (Kreijger, 1984) la peau de béton correspond aux premiers millimètres de béton à partir de la surface. La peau de béton durci peut être divisée en 3 couches et leurs compositions sont différentes par rapport au cœur. Il est constitué particulièrement de particules fines avec différentes couches. Une couche de pâte de ciment d’environ  $0.1\ \text{mm}$ , une couche de mortier d’environ  $5\ \text{mm}$  et pour finir une couche de béton d’environ  $30\ \text{mm}$  (Figure I.5). D’autre part, il a conclu que la porosité dans la peau de béton est plus importante par rapport à son cœur (Figure I.4). Ainsi, la peau du béton et surtout à la concentration de particules fines vers la surface est due explicitement à l’effet de paroi (Vénaut, 1989). Selon (Martin, 2007), la peau de béton, correspond à la microrugosité et la brillance des surfaces qui pendant de la mise en place prend la forme de coffrage et s’incrute dans tous les pores ou aspérités. Donc, les surfaces des parements en béton dépendent des surfaces de coffrage. Si les coffrages ont des surfaces lisses tels que le verre, la peau sera lisse et brillante, alors que si les coffrages sont rugueuse et absorbants, la peau aura une surface rugueuse et mate.

### I.3 Paramètres influençant la teinte des parements bruts

Les paramètres influençant sur la teinte du béton peuvent être très large, et chaque paramètre a une influence plus ou moins importante sur la teinte. Selon (Lallement, 2001), les

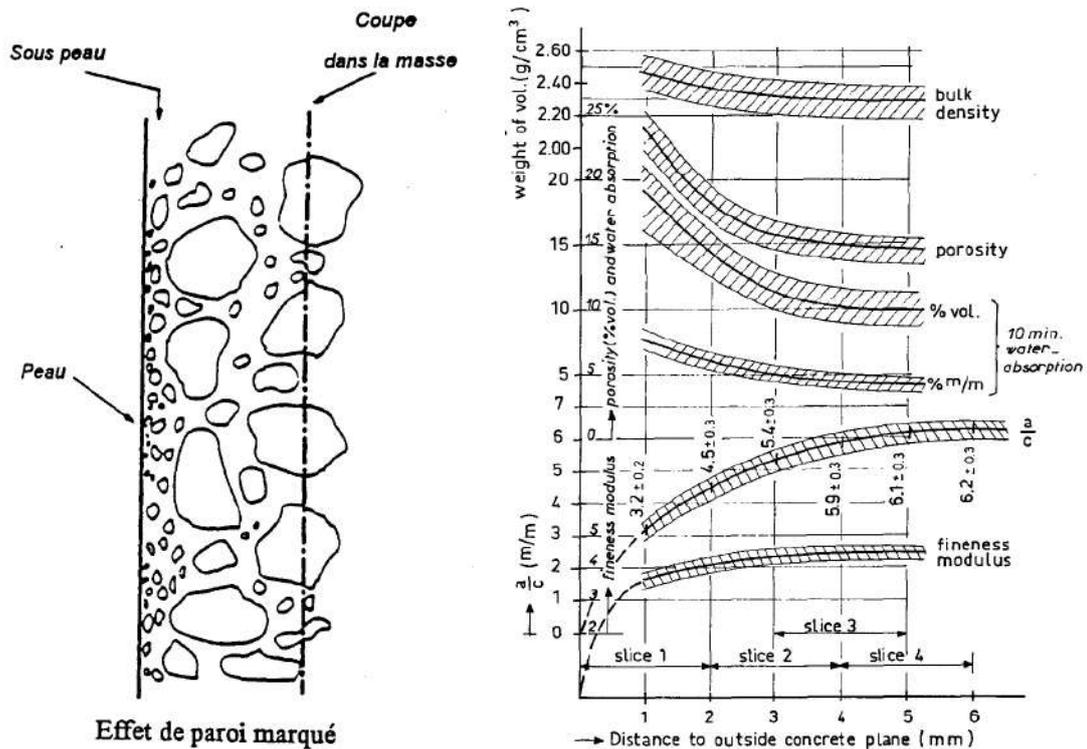


FIGURE I.4 – Différents aspects du béton suivant les coupes effectuées plus ou moins loin de la surface de démoulage (Vénaut, 1989) (gauche) et variations de la composition et de propriété de la peau de béton (Krejiger, 1984)(droite)

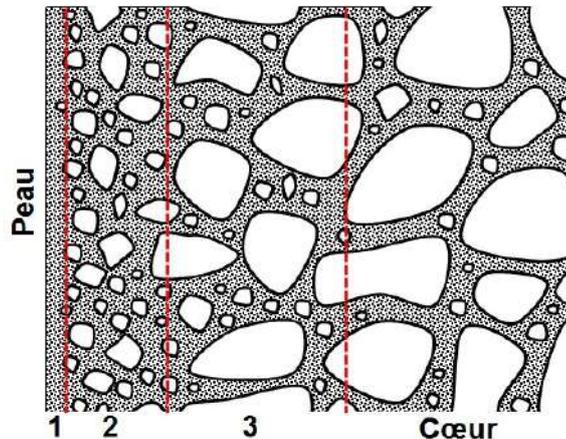


FIGURE I.5 – Peau du béton et son coeur. 1) pâte de ciment, 2) mortier 3) béton de surface et le coeur du béton

paramètres déterminants la teinte d'un béton à granulats constant sont le ciment, l'adjuvant, les additions minérales, le coffrage et l'affaissement liés à la variation d'eau, où le ciment est de loin l'élément prépondérant de la teinte du béton. Dans les variations de teinte, le paramètre principal utilisé est la teinte ou la clarté, notée  $L^*$  (Voir annexe), qui prend en compte la propriété des surfaces à restituer l'énergie lumineuse qui les éclaire dans une échelle de 0 (noir) à 100 (blanc) (Lemaire, 2003). Dans la pratique, la variation de la teinte est évaluée à l'aide d'une échelle de 7 niveaux de gris selon les normes françaises P18-503 et inspirée des travaux de la commission W29 du CIB (CIB, 1974). Selon (Lallement, 2001), une hétérogénéité de teinte peut être considérée, si la différence de la clarté entre deux zones du parement est

supérieure à 3 points de clarté, et selon la norme NF P 18-503, si c'est supérieure à 2. Ensuite, nous allons détailler brièvement les principaux paramètres déterminants la teinte des bétons.

| Niveaux | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ |
|---------|-------|-------|-------|
| 1       | 89.04 | -0.88 | 1.17  |
| 2       | 79.78 | -0.72 | 0.77  |
| 3       | 70.11 | 0.45  | 0.17  |
| 4       | 67.72 | 0.36  | 0.32  |
| 5       | 56.57 | 0.13  | 0.93  |
| 6       | 46.17 | 0.79  | 1.57  |
| 7       | 34.62 | 2.00  | 2.50  |

TABLE I.1 – Échelle de référence définissant les 7 niveaux de gris avec :  $L^*$ , c'est la clarté,  $a^*$  et  $b^*$  sont ces coordonnées de chromacité (Lallement, 2001)

### I.3.1 Composition du béton

La composition et la granulométrie du béton déterminent la distribution de particules dans le béton et l'aspect de la surface du béton. La distribution de particules près de la surface de coffrage est différente de celle de son centre. Ce phénomène est appelé l'effet de paroi, où les vides existant entre le coffrage et les gros granulats sont rempli par un mortier de plus en plus fin, et la couche en surface est alors pratiquement constituée par la pâte de ciment pure. L'effet de paroi avec la vibration sont les responsables de la présence de particules fines à la surface du béton frais (Vénaut, 1989). Les paramètres de composition influençant plus sur la couleur peuvent être le ciment et la variation de l'eau de composition.

#### *Ciment*

Les différents types de ciments ont différentes couleurs et varient en fonction de leur composition. Ainsi la couleur initiale du ciment et son dosage ont leur influence sur la teinte du béton. Par exemple, nous pouvons un ciment plus gris donnera une surface plus grise par rapport au béton fait avec de ciment blanc (Figure I.6). En même temps, nous voyons la variation de couleur si nous utilisons un pigment en fonction de la couleur de ciment utilisé.

Selon la Norme EN 197-1, les ciments sont regroupés en cinq types : CEM I, II, III, IV et V. La couleur du ciment varie en fonction de la quantité de clinker principalement, plus le ciment a de clinker, plus sombre il sera. Le CEM I principalement composé de clinker (95-100%) est le plus sombre par rapport aux autres types de ciments. Plusieurs auteurs ont fait des essais pour voir la variation de la couleur en fonction du type de ciment utilisé. Par exemple un béton avec ciment portland composé (CPJ) de type CEM II avec des cendres volantes est plus clair par rapport à un béton avec de ciment portland (CPA) de type CEM I (Figure I.7). Cela est dû principalement à la variation de la quantité de clinker dans la composition des ciments. Les ciments et les éléments fins en général (diamètre inférieures à  $630 \mu m$ ) jouent un rôle déterminant sur la teinte et l'aspect du béton, donc la teinte finale de la surface varie avec la teinte de ciment utilisé (Lemaire, 2003) (CIMbeton, 2005a).

Selon Venaut, pour obtenir un beau parement et une parfaite régularité de la teinte, le dosage de ciment doit être en fonction de la dimension maximale des granulats (Ex. pour 10



FIGURE I.6 – Variation de la couleur de béton en fonction de la couleur du ciment (Pigments, 2017)

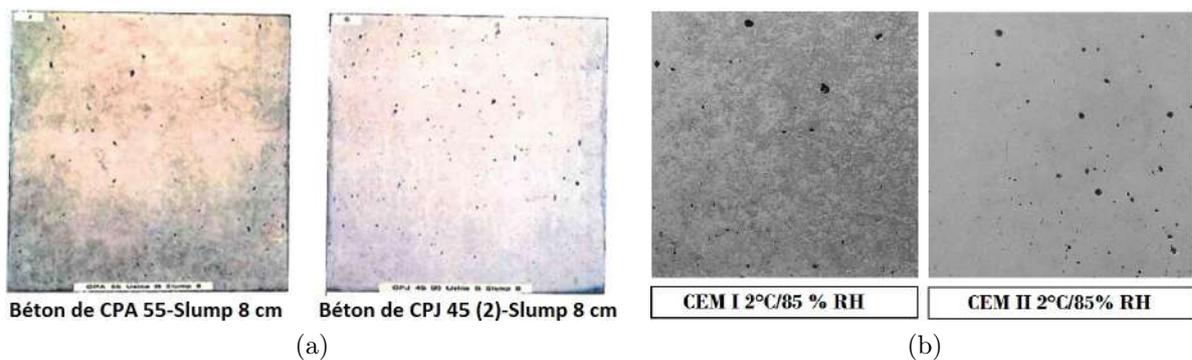


FIGURE I.7 – Variation de la couleur selon le type de ciment : (a) selon (Izoret, 2014) et (b) selon (Strehlein and P., 2008)

mm de diamètre de granulat nous utiliseront 450-550  $Kg/m^3$  en ciment).

| Diamètre max granulat<br>(mm) | Dosage de ciment<br>( $Kg/m^3$ ) |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 10                            | 450-500                          |
| 30                            | 400-500                          |
| 35                            | 350-450                          |

TABLE I.2 – Dosage de ciment en fonction de la dimension maximale des granulats (Vénaut, 1989)

### Rapport E/C

La couleur propre du béton durci est gris foncé. Selon la littérature, le béton durci devient plus claire si le rapport E/C de formulation est plus élevé. Par exemple, (Trub, 1973) a fabriqué un béton en deux couches. Une première couche avec un rapport E/C de 0,55 (en

bas) et la deuxième couche avec un rapport E/C de 0,50 (en haut). Selon ses résultats, le béton avec un rapport E/C de 0,55 paraît plus clair que le béton avec un rapport E/C de 0,50. Cela signifierait que l'augmentation de l'eau dans la formulation de béton génère un éclaircissement de la surface du béton (Figure I.8 A). La formulation et les conditions d'essais n'ont pas été détaillées dans la publication. La porosité de surface croît avec le rapport E/C. Donc, une surface paraît plus claire si elle est finement poreuse que si elle est compacte (TFB, 1966).

Dans un autre exemple, de la même manière un autre auteur a fabriqué un béton en deux couches (Izoret, 2014). Une couche inférieure avec un rapport E/C de 0,45 et une couche supérieure avec un rapport E/C de 0,40. Le ciment utilisé était un ciment CPA 55 PM. Le volume total du mélange a été de 60 litres avec un poids de 400 Kg. De ces résultats, nous pouvons observer que la couche inférieure est plus sombre que la couche supérieure. Cela signifie que l'augmentation de l'eau dans la composition du béton pourrait générer un assombrissement de la surface du béton. De ces deux résultats, nous avons différents points de vue. Pour lequel dans notre prochain travail, nous allons effectuer des essais expérimentales pour confirmer ou infirmer ces résultats.

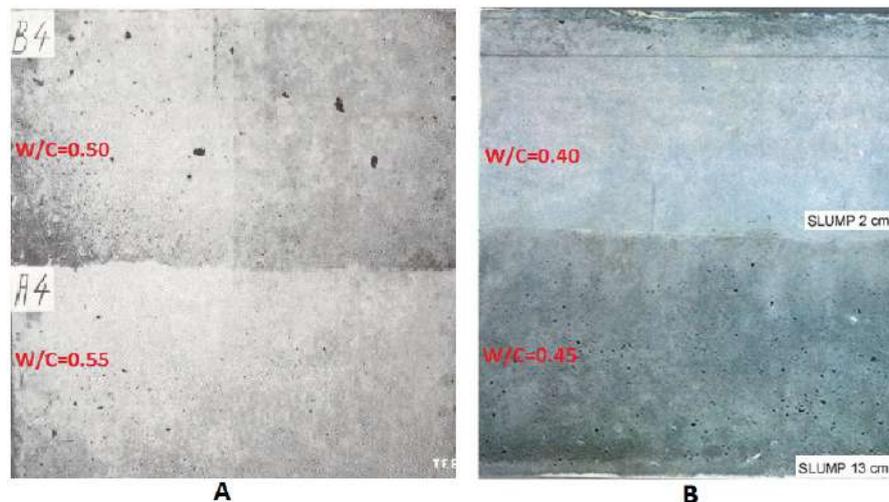


FIGURE I.8 – Effet du rapport E/C sur la teinte du parement : A) E/C=0.55 en bas, et E/C=0.50 en haut (Trub, 1973) et B) E/C=0.45 en bas, et E/C=0.40 en haut (Izoret, 2014)

### I.3.2 Minéralogie des surfaces

Une fois le béton durcit, la surface du béton peut présenter différents types de minéraux résultant de l'hydratation de ciment. L'hydratation peut générer différentes couleurs ou textures dans la surface. Les observations faites par Lallemand et Lemaire (Lallemand, 2001) (Lemaire, 2003) par rapport aux assemblages minéralogiques constitutifs des zones claires et des zones sombres convergent vers les mêmes. Ses essais ont été faits en utilisant le microscope optique, le MEB, la diffraction des rayons X, la spectrométrie infra-rouge et la microscopie électronique à transmission. Par exemple, la calcite et les C-S-H ont été identifiés dans les surfaces des bétons, avec plus de calcite dans les zones claires et plus de C-S-H dans les zones sombres. Au MEB, les zones sombres présentent une forte micro fissuration et dans certains cas, la teneur en soufre est légèrement plus importante. Quant au potassium, il est plus élevé dans les zones claires que dans les zones sombres, qui est considéré comme un indicateur indirect d'une forte porosité. La porosité peut être plus importante dans la zone

claire et ainsi les zones sombres paraissent plus compactes et moins cristallisées. D'autre part, (Izoret, 2014), il a trouvé que l'augmentation de pourcentage de teneur en Fer dans la peau de béton, entraînent la diminution de la clarté selon différents types de ciment (Figure I.9).

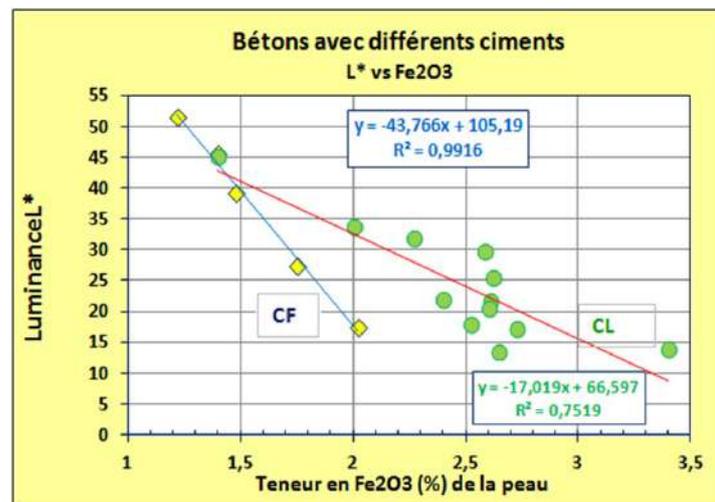


FIGURE I.9 – Variation de la clarté de la peau du béton en fonction de la teneur en fer (Izoret, 2014)

### I.3.3 Morphologie et rugosité des surfaces

La variation de la texture ou de la rugosité de la surface peuvent déterminer la couleur de béton. Selon (Lallement, 2001) les zones claires et les zones sombres n'ont pas de contours géométriques propres. Les échantillons étudiés ont été prélevés par carottage sur les sites industriels. La formulation et les conditions de fabrication des bétons ne sont pas connues. L'étude a été faite en utilisant le MEB pour déterminer la morphologie et relief de surface. Le relief de surface semble plus faible dans la zone sombre comparativement à la zone claire. La structure de surface apparaît plus compacte dans la zone sombre et avec la présence des agglomérats de cristaux de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu m$  dans la zone claire. Les zones claires sont creuses et les zones sombres semblent lisses (Figure I.10).

D'après (Lallement, 2001) qui a fait des études sur des échantillons provenant de sites industriels localisés en Rhône-Alpes et Champagne-Ardenne pour les comparaisons optiques entre des zones claires et des zones sombres. Des surfaces des échantillons montre que le relief de surface varie en fonction du type de zone. Certaines zones claires observées avec un stéréomicroscope apparaissent creuses alors que les zones sombres semblent plutôt lisses (Figure I.11). Lallement a fabriqué aussi du béton en laboratoire, et elle a observé que les compositions de béton dont le rapport E/C et le dosage en superplastifiant est faible, les surfaces présentent des hétérogénéités et en général nous trouvons une zone claire autour des bulles. La clarté moyenne de la zone claire est plus grande que la moyenne de clarté de la zone sombre, avec un écart de 16 et 18 points, ce qui correspond à un contraste de teinte compris entre 23 et 30 %. Le coefficient de diffusion de la zone claire est plus élevé que celui de la zone sombre. Finalement, l'épaisseur de 100  $\mu m$  correspond à l'épaisseur maximale déterminante vis-à-vis des phénomènes optiques et donc de la teinte du béton.

En revanche, d'après les travaux d'Izoret (Izoret, 1992), dans les bétons, la surface sombre est plutôt rugueuse que la zone claire (lisse) (Figure I.12). Nous ne connaissons pas les détails de fabrication sur les échantillons prélevés de sites industriels pour faire des comparaisons

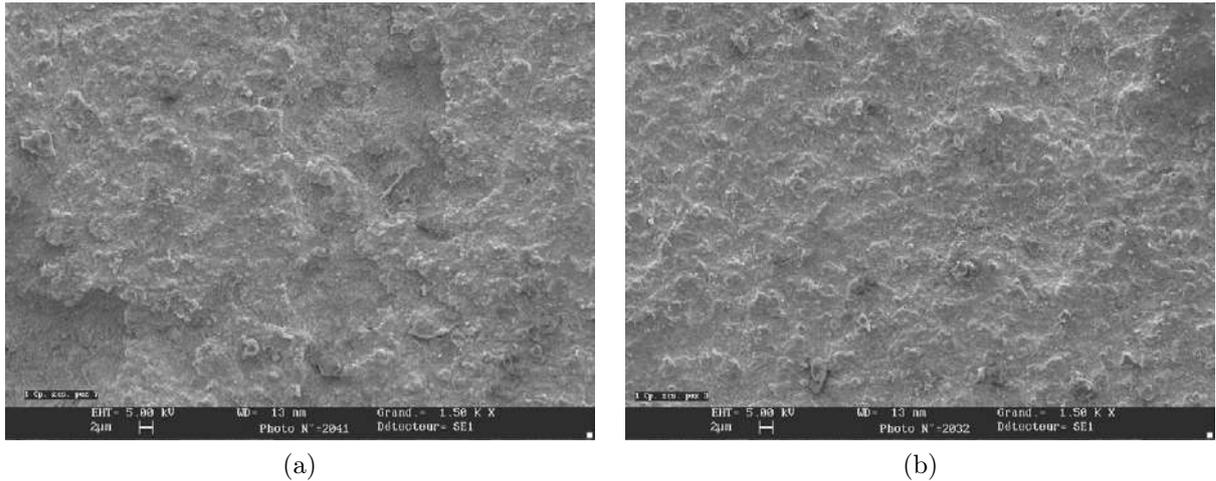


FIGURE I.10 – Observations au MEB en électrons secondaires de la surface d’une corniche de pont : (a) zone claire et (b) zone sombre (Lallement, 2001)

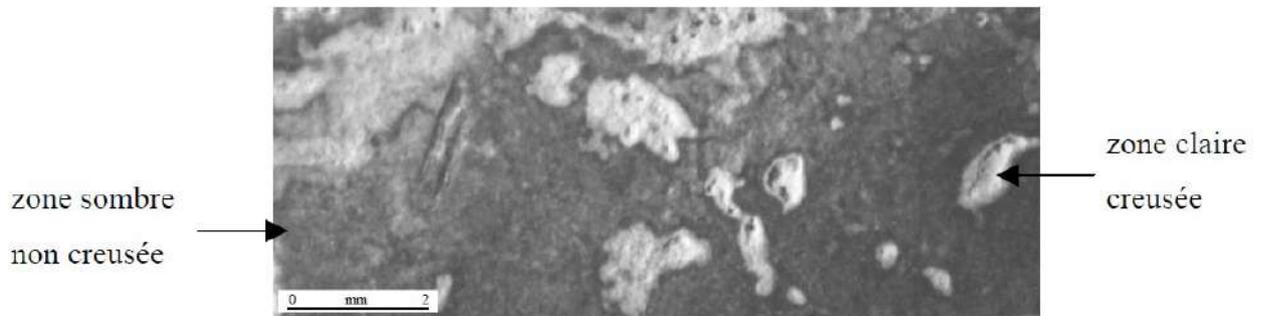


FIGURE I.11 – Aspect de surface de l’échantillon de la semelle au stéréomicroscope (Lallement, 2001)

exactes, mais apparemment nous avons à nouveau des observations différentes dans la littérature à propos de la relation entre la rugosité des surfaces et la clarté. Nous allons effectuer à travers de cette thèse des essais expérimentaux afin de déterminer cette relation en faisant varier le rapport E/C.

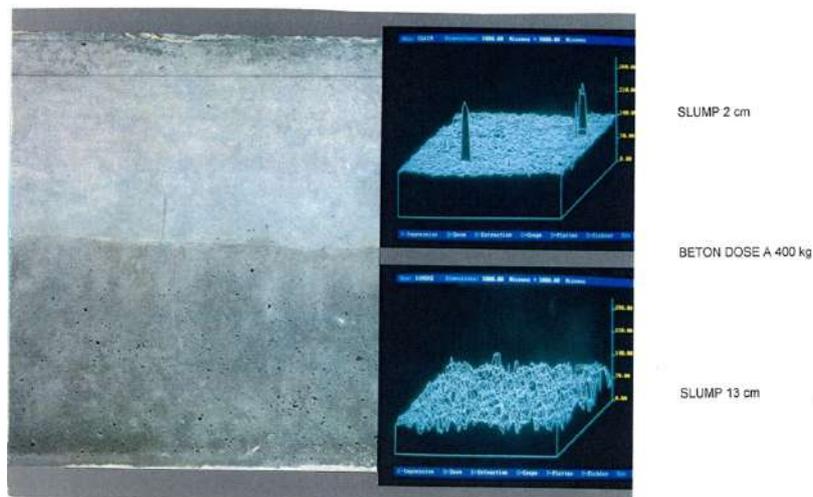


FIGURE I.12 – rugosité en fonction de rapport E/C (Izoret, 2014)

### I.3.4 Surface du moule et produit de démoulage

La surface du béton est le reflet de la surface du moule. Ainsi, la rugosité de la surface du béton dépend de celle de la surface du moule utilisé. Par exemple, un moule avec une surface lisse donne des pâtes lisses, les pâtes coulées dans un moule de surfaces rugueuses donne des pâtes avec des surfaces rugueuses. Le type de moule utilisé a aussi une influence déterminant sur l'état de surface du béton. Par exemple, les moules absorbants (bois) ont une grande facilité d'absorption de l'eau excédentaire du béton frais qui évitent en général la formation de bulles d'air à la surface du béton et diminuent le rapport E/C de la surface pour le rendre plus foncée (Martin, 2007) (Lallement, 2001).

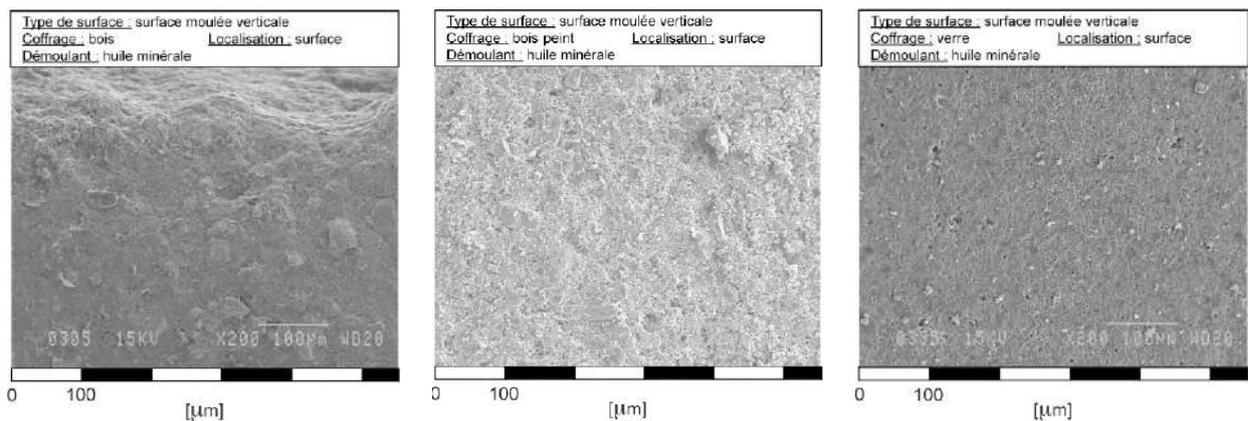


FIGURE I.13 – Influence du type de coffrage et de la rugosité de coffrage sur la surface du béton (Martin, 2007)

D'après la Figure I.13, nous pouvons voir la différence de surfaces obtenues à partir de 3 différents types de coffrage utilisés avec différentes rugosités de coffrage. Les échantillons ont été moulés avec de l'huile minérale (hydrophobe) comme agent démoulant. Le premier (gauche) est coulé dans un coffrage en bois contreplaqué qui a une surface rugueuse et absorbante, le deuxième (centre) avec un coffrage bois peint qui a une surface lisse et absorbante, et le dernier (droite) avec un coffrage en verre qui a une surface très lisse est non absorbante. Nous constatons que la rugosité de surface dépend de la rugosité de coffrage. Dans tous les cas l'auteur a trouvé une brillance mate dans les surfaces. Un autre exemple, selon Martin, le parement moulé avec une surface coffrante en PMMA (non absorbante) est gris très clair presque blanc, lisse et brillant, et le parement moulé avec une surface coffrante en bois (absorbante) est un peu plus foncé et mate. Ceci pourrait influencer sur la porosité de la peau.

L'étanchéité de moule joue un rôle important. Ainsi, quelque soit le type du coffrage, les coffrages étanches retiennent de l'eau et des fins en surface c'est ce qui augmente le rapport E/C de la surface. Donc, la surface durcie devient plus claire (Martin, 2007).

Les décoffrants ou démoulants, sont des produits anti-adhérent (huile minérale, résine, cire, etc.) appliqués à la brosse ou pulvérisés avant le coulage sur les peaux de coffrage, afin de faciliter le décoffrage et la réutilisation des coffrages (Infociments, 2016). Les démoulants de type barrière physique (hydrophobe), tel que l'huile minérale, agissent en séparant le béton du coffrage. Lorsque le démoulant est appliqué, aucune liaison n'est possible entre le coffrage et le béton, et rend la surface plus claire en retenant l'eau en surface par rapport à ceux qui sont coulés avec une émulsion (hydrophile) (Martin, 2007). Ainsi, la clarté et l'homogénéité des surfaces varient de manière significative en fonction du type de démoulant utilisé (Lallement,

2001) (Figure I.14).

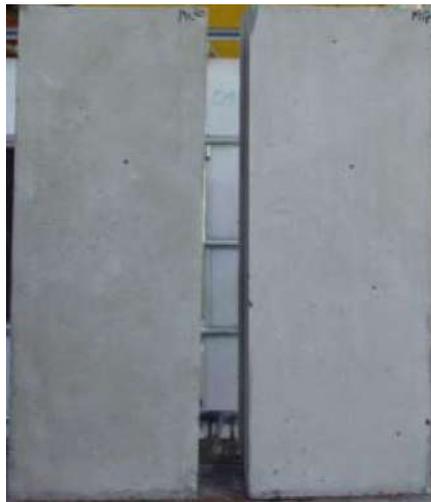


FIGURE I.14 – Influence du type de l’huile de coffrage sur la couleur de la surface du béton à partir d’un coffrage métallique : émulsion (gauche) et cire minérale (droite) (Lallement, 2001)

D’après la Figure I.15, dans un coffrage avec de l’huile minérale, la surface est moins rugueuse par rapport à la surface avec de l’émulsion comme démoulant. Selon Martin, les surfaces coulées sur des coffrages lisses sans démoulant sont plus lisses que celles coulées sur des coffrages huilés. Ainsi, lorsque la surface coffrante est lisse, l’utilisation d’un démoulant va augmenter la micro rugosité de la surface du béton. Quand la surface coffrante est rugueuse, le démoulant permet d’atténuer la rugosité de la surface de béton.

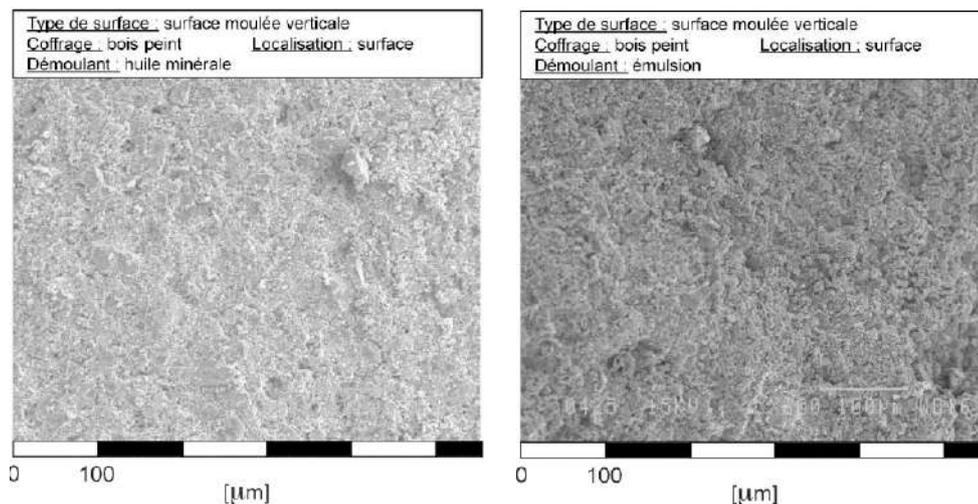


FIGURE I.15 – Influence du type de l’huile de coffrage sur la surface du béton à partir d’un coffrage en bois peint (Martin, 2007)

L’augmentation de la quantité d’agent de démoulage en allant jusqu’à 100 % par rapport à la valeur maximale recommandée par le fabricant, elle ne semble pas avoir aucun effet sur l’apparence de la surface du béton selon (Strehlein and P., 2008). Mais, d’après l’entreprise *Cresset Chemical CO*, qui a développé une série d’essais en béton pour déterminer l’influence d’épaisseur de l’huile sur la surface finale du béton. Tous les échantillons ont été coulés à partir du même mélange de béton, dans des conditions identiques en utilisant l’acier comme

matériau de coffrage et à l'exception de l'épaisseur de l'agent de démoulage. Les échantillons ont été classés en fonction de la répartition de l'agent de démoulage et la taille de bullage. La meilleure surface avec un bon aspect a été obtenue avec un film d'agent de démoulage la plus mince (inférieure à  $0,0127\text{ mm}$  d'épaisseur). La plus mauvaise surface a été obtenue avec trop d'épaisseur d'huile de démoulage, qui à la fois augmentera le nombre de bullage dans la surface du béton (Figure I.16).

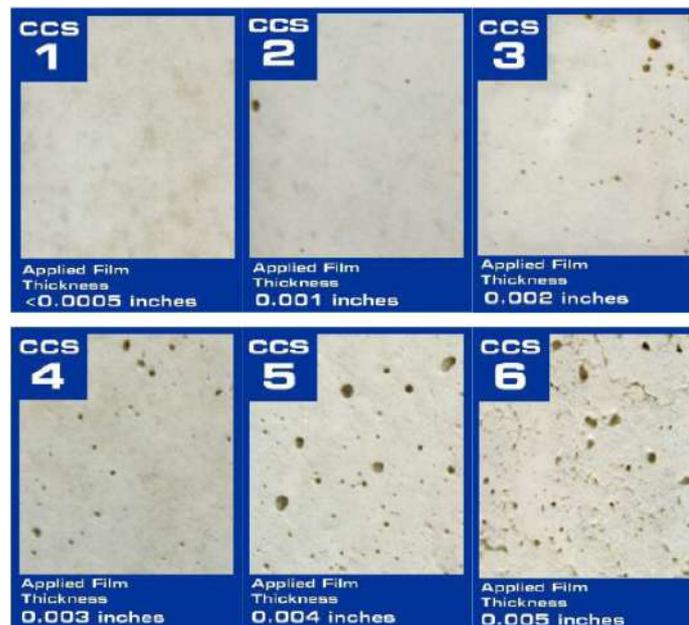


FIGURE I.16 – Effet de la quantité d'huile de démoulage sur l'aspect de parement (Chemical, 2018)

Donc, si on fait une analyse entre rugosité et couleur, d'après la Figure I.15, nous avons remarqué qu'avec une émulsion utilisée comme démoulant donne une surface plus rugueuse par rapport à l'huile minérale, et d'après la Figure I.14, un coffrage avec de l'émulsion donne une couleur plus foncée que le coffrage avec une cire minérale. Donc, nous pouvons conclure qu'un béton fabriqué avec de l'émulsion est très rugueux et donnera une couleur plus foncée à la fin (même si les deux coffrages sont de différents types avec différentes conditions de fabrication).

### I.3.5 Mise en place et compactage

L'ordre d'incorporation des constituants dans le malaxeur et la durée de malaxage ne permettent pas d'éviter ou diminuer les hétérogénéités de teinte dans les mortiers (Lallement, 2001). La mise en place et le serrage du béton frais durant le coulage sont obtenus par vibration, où tous les grains du béton sont soumis à des amplitudes et accélérations qui entraînent des mouvements les uns par rapport aux autres et ce qui provoque un tassement conduisant au serrage du béton ((Geoffray, 1991); Bresson, 1995c)(Lallement, 2001). Selon [Bresson], la vibration provoque des mouvements d'eau qui peuvent être responsables de légères variations locaux du rapport E/C et donc, de la teinte. Une mise en place difficile (faible ouvrabilité) provoque des hétérogénéités de teinte dans les mortiers selon (Lallement, 2001). Le rôle de la vibration est de favoriser l'arrangement de grains qui sont les constituants du béton. Un double rôle (CIMbeton, 2013) :

1. La mise en place est facilitée : remplissage des moules, enrobage des armatures, meilleure esthétique du béton.
2. Augmentation de la compacité et l'homogénéité du matériau, avec moins de vides d'air (effets de serrage) sans ségrégation (gain de résistance mécanique).

La technique la plus utilisée sur les chantiers de construction est la pervibration, qui consiste en l'enfoncement répétitif d'une aiguille vibrante dans le béton frais. Dans le cas d'une préfabrication en usine, la vibration externe est préférentielle, qui consiste en l'utilisation d'une table vibrante ou de moteurs électriques fixés sur les parois coffrantes. Quelque soit le type de vibration, la vibration permet au béton de se compacter, de se désaérer et d'assurer une bonne liaison entre les armatures métalliques et le matériau (Grampeix, 2013).

Le béton, soumis à la vibration, se comporte comme un corps plastique qui abaisse le seuil de cisaillement et facilite l'écoulement du béton. Une aiguille vibrante plongée dans le béton frais, crée une succession de zones concentriques (CIMbeton, 2013) :

1. Une zone périphérique déjà serrée et désaérée ;
2. Une zone en cours de plastification ;
3. Et une zone qui n'est plus accessible à la vibration.

Donc, à partir des observations macroscopiques la qualité de la vibration peut être divisée en trois catégories (Grampeix, 2013) :

1. Sous vibration : Le béton présente des hétérogénéités locales et de la porosité au sein du matériau Figure I.17 (gauche) ;
2. Sur-vibration : Risque de sédimentation au fond du coffrage avec une superposition de couche de granulats du plus lourds au plus légers, jusqu'à obtenir une surface en excès d'eau Figure I.17 (droite) ;
3. Vibration efficace ou bonne : Le béton est homogène avec propriétés mécaniques de qualité et une quantité modérée de bullage de l'ordre millimétrique.



FIGURE I.17 – Exemples d'une sous-vibration (gauche) et sur-vibration (droite)

### I.3.6 Temps de décoffrage et conditions climatiques

La maturation de décoffrage dans les pâtes et les bétons a une influence sur la clarté. Ainsi selon (Lemaire, 2003) à partir des essais sur les pâtes de ciment, il a observé trois phases de variation de la teinte. La clarté augmente si l'âge de décoffrage est entre 15 et

20 heures, entre 20 et 48 heures la clarté reste stable, et après 48 heures, la clarté diminue. Cet influence est très significative dans les ciments contenant de  $C_4AF$ . Cette variation de la clarté peut être expliquée en partie par l'évolution de la porosité accessible à l'eau de surface, ainsi, plus la porosité est grande et plus le béton est clair. Autre remarque que fait l'auteur, un décoffrage aux jeunes âges où la peau de béton n'est pas suffisamment résistante, peut rester collé sur le coffrage, et donc la clarté du parement sera nettement diminuée.

L'apparence de la surface de béton peut dépendre aussi, de la température et de l'humidité relative de l'air immédiatement après démoulage. Par exemple, selon (Lallement, 2001), les mortiers de E/C 0.4 placés à 5°C sont plus sombres par rapport aux mortiers placés à 20°C. Les conditions climatiques défavorables (une basse de température avec hautes humidités relatives) font que les bétons sont plus sombres et avec une hétérogénéité de la teinte plus forte (Strehlein and P., 2008)(Figure I.18).

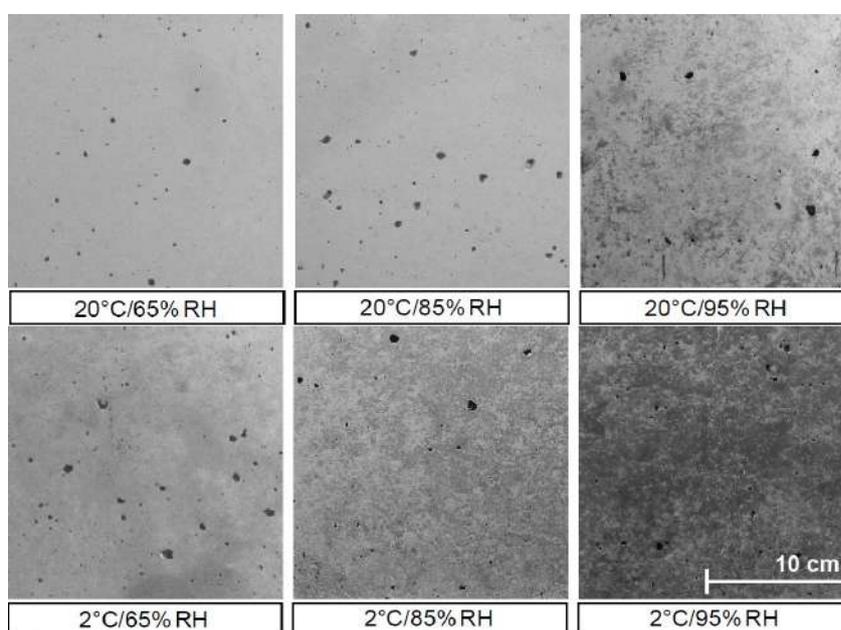


FIGURE I.18 – Effet des conditions atmosphériques sur l'aspect du parement (Strehlein and P., 2008)

## I.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons parlé des parements de béton et résumé les différents facteurs influençant sur la variation de la teinte des surfaces de matériaux cimentaires à partir de plusieurs travaux de recherche. La teinte de la surface du béton dépend de la peau de béton étant constitué principalement de ciment et de particules fines dans les premiers millimètres dû à l'effet de paroi. La variation de la teinte (claire/sombre) dépend du constituant du béton, surtout de constituant les plus fins (ciment, granulats, adjuvants, etc.), de la formulation (E/C, S/C, etc.), la rugosité de coffrage, du type et quantité d'huile de démoulage utilisée et des conditions environnementales après démoulage.

Les paramètres plus importants influençant la variation de la teinte de la surface de béton nous l'avons résumé dans le Tableau I.3 :

A partir du Tableau I.3 nous avons observé que les zones claires présentent plus de calcite,

| Zone claire                                    | Paramètres                   | Zone sombre                      |
|--|------------------------------|----------------------------------|
| Élevé  | Rapport E/C *                | Bas                              |
| Creusée, poreuse                               | Rugosité *                   | lisse et compacte                |
| Plus de calcite,<br>$Ca(OH)_2$ ou<br>potassium | Composition<br>minéralogique | Plus de $C - H - S$<br>ou soufre |
| Courte   | Durée de cure                | Longue                           |
| Grand  | Taille de pore               | Petit                            |
| Élevée   | Température de conservation  | Basse                            |

TABLE I.3 – Paramètres influençant sur la variation de la teinte

portlandite ou de potassium sur les surfaces, par rapport aux surfaces sombres. La durée courte de cure avant le décoffrage entraînerait une surface claire. Les surfaces claires sont caractérisées pour présenter des pores de surface de grands tailles, et les surfaces sombres présentent des pores de petites tailles. Concernant la température de conservation après démoulage, les échantillons conservés à haute température donneront une surface plus claire, et sombre s'ils sont conservés à basse température. De la même façon, une humidité très importante entraînera une surface plus sombre, par rapport à un échantillon conservé à basse humidité.

Concernant les paramètres précédents, les observations sur la variation de la teinte en fonction du rapport E/C sont différentes, l'augmentation de rapport E/C entraînera l'éclaircissement de la surface de matériaux cimentaires selon certaines observations, et selon d'autres observations, l'augmentation de rapport E/C fera que la surface soit plus sombre. Il en est de même pour la rugosité, certains auteurs ont trouvé qu'une surface creusée très poreuse permet d'obtenir une surface claire, et une surface lisse et compacte génère une surface sombre. Un autre auteur a trouvé que les surfaces sombres sont plus rugueuses par rapport à les surfaces claires. Donc nous avons des observations différentes pour ces paramètres (rugosité et teinte en fonction du rapport E/C). A partir de ces points de vue différents par rapport à la variation de la teinte et de la rugosité en fonction de rapport E/C, nous allons mener une campagne expérimentale afin de démentir ou confirmer ces différentes observations.

Dans la mise en place et compactage, la vibration provoque des mouvements d'eau qui peuvent être responsables de légères variations locales du rapport E/C et donc, de la teinte et de la rugosité. Une mise en place difficile (faible ouvrabilité) provoquerait des hétérogénéités de teinte. Donc, les propriétés d'écoulement du béton à l'état frais seraient en partie responsable de l'aspect final du béton une fois durcie.

Dans le chapitre suivant, nous allons donc étudier la rhéologie de matériaux cimentaires, afin de réaliser un lien entre la rhéologie et son influence sur la variation de l'aspect (teinte et rugosité) de la surface. La rhéologie va nous permettre de connaître les propriétés rhéologiques en fonction du rapport E/C que nous pouvons les liées avec les aspects finals de nos matériaux cimentaires. A partir de ces propriétés rhéologiques nous pouvons déterminer les modèles mathématiques le plus adapté pour décrire le comportement des matériaux cimentaires que nous pouvons l'utiliser par la suite par la modélisation.

# CHAPITRE II

## Rhéologie des matériaux cimentaires

Dans ce chapitre, nous étudierons le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. Premièrement, nous verrons comment le comportement d'un matériau cimentaire peut varier en fonction du temps d'hydratation, qui peut durer quelques heures. Nous commencerons par décrire le seuil d'écoulement des pâtes de ciment, qui peut être lié à l'interaction entre les particules de ciment dans l'eau au cours des premières minutes de mélange. Pour briser ces interactions entre ces particules, une certaine quantité d'énergie ou de force est nécessaire. Selon la littérature, ces forces pourraient être liées à la présence de ponts CSH et à différentes forces dites colloïdales. Ensuite, nous énumérerons les différentes façons de décrire le comportement rhéologique des matériaux cimentaires, en commençant par décrire les modèles les plus utilisés, simples et discontinus, appelés modèles classiques, puis les modèles modifiés par Papanastasiou à partir des modèles classiques, devenant modèles continus. Nous continuerons avec la description des erreurs possibles de mesures ou d'analyse de données rhéologiques, et nous donnerons des pistes pour les éviter. Nous continuerons en décrivant les principaux facteurs pouvant affecter la rhéologie des matériaux cimentaires. Et enfin, nous montrerons des méthodes empiriques pour mesurer le comportement d'un matériau frais, ainsi que l'obtention de données grâce à l'utilisation du rhéomètre.

### II.1 Introduction générale

#### II.1.1 Suspension

La pâte de ciment est simplement le mélange de particules de ciment avec l'eau. Ce mélange peut être considéré comme une suspension dispersée dans un liquide newtonien (l'eau). Dans la pratique, le rapport E/C varie entre 0.20 et 0.60 avec une fraction volumique de particules de ciment entre 0.35 et 0.60. Dans un liquide pur, les couches de fluide glissent les unes sur les autres en cisaillement simple. Pour une suspension, les couches de fluide suivent des trajectoires plus complexes en raison de la présence des particules. Tant que la distribution des éléments dans l'espace reste isotrope et constante, la suspension est newtonienne (Roussel, 2012).

Un paramètre critique du comportement des suspensions est la fraction volumique ( $\phi$ ) des éléments en suspension, c'est-à-dire le rapport entre le volume total des éléments solides et le volume total de l'échantillon. Lorsque la fraction volumique des éléments solides est suffisamment faible, les éléments sont éloignés les uns des autres. Nous pouvons alors

dire que les éléments n'interagissent pas hydrodynamiquement. Dans ce cas, la suspension a généralement un comportement rhéologique similaire à celui du liquide interstitiel, avec éventuellement des paramètres rhéologiques légèrement différents. La rhéologie de systèmes monodisperses en solution diluée avec une fraction volumique très faible sans interaction entre particules, obéit à la loi d'Einstein (Einstein, 1911) décrite par :

$$\mu(\phi) = \mu_0(1 + 2.5\phi) \quad (\text{II.1})$$

Où  $\phi < 2\%$  est la fraction volumique occupée par les  $n$  sphères avec  $\phi = 4/3\pi nR^3$  et  $\mu_0$  est la viscosité du liquide suspendant.

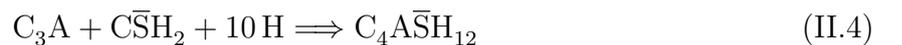
D'un point de vue physique, la pâte de ciment à l'état frais peut être considérée comme une suspension de particules de ciment de différentes tailles dans un fluide (l'eau). Les écoulements de suspensions mettent en jeu des interactions entre particules qui sont souvent complexes. Les particules ont un effet sur les paramètres rhéologiques tels que le seuil de cisaillement et la viscosité. D'une manière générale la viscosité d'une pâte de ciment augmente quand sa concentration en solides augmente. Pour des fractions solides plus grandes où les éléments interagissent de manière significative ( $>2\%$ ), nous pouvons utiliser les expressions du Tableau II.1 :

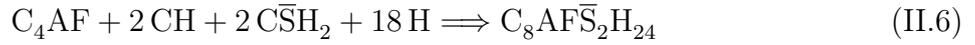
| Modèle                   | Viscosité relative   | Géométrie de particules |
|--------------------------|--|-------------------------|
| Krieger-Dougherty (1959) | $\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m}$    | Sphériques              |
| Quemada (1977)           | $\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2}$            | Ne prend pas en compte  |
| Mooney (1951)            | $\mu = \mu_0 \left(\frac{2.5\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_m}}\right)$ | Sphériques              |

TABLE II.1 – Différents modèles pour décrire la viscosité des suspensions concentrés

## II.1.2 Hydratation de la pâte de ciment

La rhéologie dépend aussi du degré d'hydratation du ciment. Le ciment Portland, par exemple, est principalement constitué du clinker, qui est constitué des quatre phases principales décrites par (Bogue, 1952), Alite ( $C_3S$ ), Belite ( $C_2S$ ), ainsi que deux phases métalliques, ( $C_3A$ ) et ( $C_4AF$ ). Avec les phases  $C_3S$  et  $C_2S$  qui représentent environ 75% de la masse de ciment Portland (Aïtcin, 2016). Ces phases (anhydres) au contact avec de l'eau, réagissent chimiquement pour produire des hydrates : les silicates de calcium hydratés (**CSH**), la portlandite (**CH**), l'ettringite (**AFt**) et le monosulfoaluminate de calcium hydraté (**AFm**). Les principales réactions d'hydratation des ciments sont résumées dans la liste suivante selon (Papadakis et al., 1991) :





Avec :

|                             |   |                               |
|-----------------------------|---|-------------------------------|
| $\overline{CSH}_2$          | : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$                            | Gypse                         |
| CH                          | : $Ca(OH)_2$                                      | Portlandite                   |
| CSH                         | : $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$                 | Silicate de calcium hydraté   |
| $C_3AC\overline{S}_3H_{32}$ | : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ | Ettringite                    |
| $C_3AC\overline{SH}_{12}$   | : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$  | Monosulfoaluminate de calcium |

L'hydratation du ciment Portland se décompose en cinq phases selon la Figure II.1 :

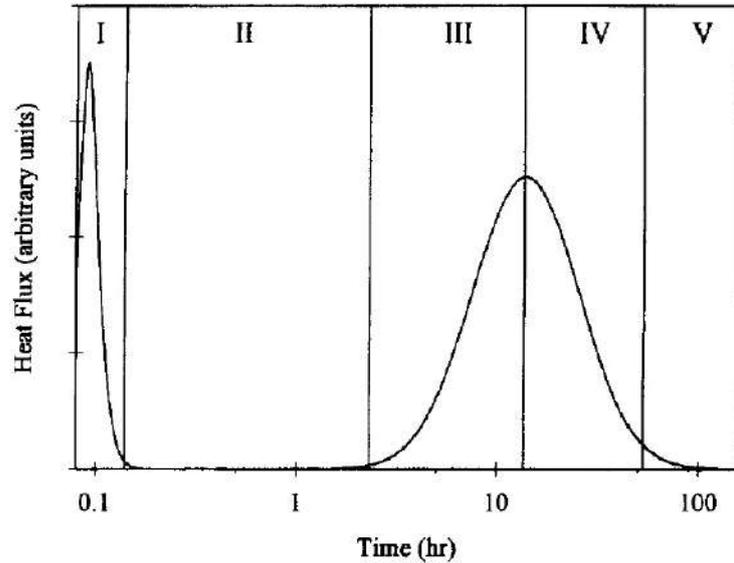


FIGURE II.1 – Thermogramme schématique d'hydratation du ciment montrant cinq étapes distinctes dans le processus d'hydratation. (Jolicoeur and Simard, 1998)

- I Procédés d'hydratation initiaux (0-15 min). Mouillage et dissolution des anhydres et précipitation rapide des hydrates.
- II Période d'induction ou phase de latence (15 min - 4 h). Période dormante.
- III Accélération et ensemble (4-8 h). Période qui comprend depuis le début de prise jusqu'à la fin de prise. Avec une formation d'ettringite et C-S-H. Nous avons aussi la précipitation de CH.
- IV Décélération et durcissement (8-24 h). S'il n'y a plus de C-S-H, l'ettringite produit de monosulfo-aluminate.
- V durcissement (1-28 jours). Hydratation contrôlée par la diffusion.

En ce qui concerne l'effet de l'hydratation sur la rhéologie aux stades précoces, l'hydratation des phases d'aluminate peut être extrêmement rapide (minutes), entraînant une perte

prématurée de l'ouvrabilité. Afin d'éviter ce problème, des sulfates de calcium sont ajoutés (Flatt, 2001). Pour comprendre mieux l'effet de l'hydratation sur la rhéologie, nous détaillons les deux premières périodes de l'hydratation selon (Jolicoeur and Simard, 1998).

### Phase I

Dans les premières quinze minutes du contact du ciment et de l'eau, les composants les plus solubles ( $NaSO_4$ ,  $KSO_4$ ,  $CaSO_4.xH_2O$ ) sont dissous dans la phase aqueuse et relâche des espèces ioniques tel que le  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OH^-$ . En même temps, l'hydrolyse des silicates et des aluminates les plus réactives libèrent  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$ , ce qui entraîne l'augmentation du pH d'environ 13. Les processus d'hydrolyse et de solubilisation conduisent à la formation d'une couche mince de produits d'hydratation amorphes intermédiaires. Cette couche "protectrice" empêche la diffusion des espèces réactives

En présence d'une teneur et d'une disponibilité adéquate en  $SO_4^{2-}$ , plusieurs processus physico-chimiques contribuent ultérieurement à l'évolution du système ciment-eau : la croissance continue des cristaux d'ettringite, l'augmentation de la production de gel C-S-H conduisant à un recouvrement ("couche externe") de C-S-H sur la couche de gel riche en aluminate initiale, l'augmentation des concentrations de  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  en solution. Ces processus déterminent le comportement du système cimentaire, en particulier ses propriétés rhéologiques et son temps de prise initial (Flatt, 2001). La composition ionique de la solution évolue avec le temps et dépend également du type de ciment (Tableau II.2).

| E/C  | $K^+$  | $Na^+$ | $Ca^{2+}$ | $SO_4^{2-}$ | $Si^{4+}$ | $Mg^{2+}$ | $Al^{3+}$ | $OH^-$ | pH    |
|------|--------|--------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------|-------|
| 0.35 | 123.94 | 28.14  | 18.31     | 58.72       | 0.05      | 0.04      | 0.07      | 70.79  | 12.85 |
| 0.45 | 119.60 | 27.12  | 22.28     | 50.34       | 0.4       | 0.02      | 0.09      | 93.3   | 12.97 |

TABLE II.2 – concentration ionique pour deux suspensions de ciment comme rapporté par Yang. et al. La force ionique est 266.3 et 268.9 mM (Flatt, 2001)

La phase  $C_3A$  subit une dissolution extrêmement rapide qui conduit à la formation d'hydrates d'aluminate de calcium qui rigidifient très rapidement la suspension (formation de cols durs entre les particules coagulées (flash set)) (Figure II.2 b). Avec le gypse, le sulfate de calcium dissous réagit avec les aluminates de calcium pour produire de l'ettringite ou du monosulfate. La formation d'ettringite évite la formation prématurée de cols durs entre les particules coagulées (Figure II.2 c).

Les particules de ciment présentent des forces interparticulaires qui sont les paramètres les plus pertinents à utiliser pour discuter de la rhéologie de suspension. Nous avons alors des forces de dispersion attractives entre deux particules de rayon  $a_1$  et  $a_2$  à petite distance de séparation  $F_{(a_1,a_2,h)}$  et les forces électrostatiques  $F_{ES}$  :

(Roussel, 2012) décrit l'évolution de la pâte de ciment fraîche pendant la période dormant selon la Figure II.3 :

- A la fin de la phase de mélange, les particules de ciment sont dispersées (figure 9 (a))
- A cause des forces d'attraction colloïdales, les particules de ciment flocculent en quelques secondes et forment un réseau de particules en interaction capables de résister à la contrainte et d'afficher un module d'élasticité (figure 9 (b))
- Nucléation du CSH qui transforme localement les interactions colloïdales molles entre les particules de ciment en ponts CSH.(figure 9 (c)).

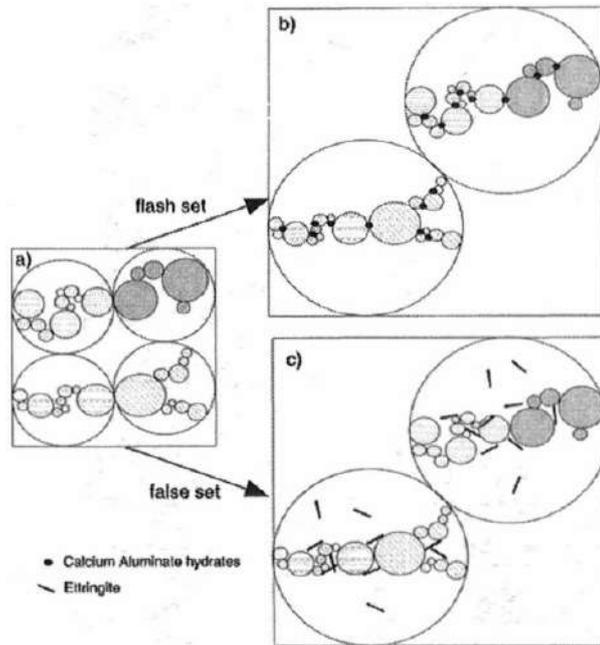


FIGURE II.2 – Représentation schématique de la taille minimale de l’agglomérat. (a) la situation normale, (b) les cols solides sont formés par les aluminates de calcium (c) les aiguilles de gypse précipitent dans l’espace poreux.

— Augmentation de la taille ou du nombre de ponts CSH entre les particules de ciment percolées (figure 9 (d)).

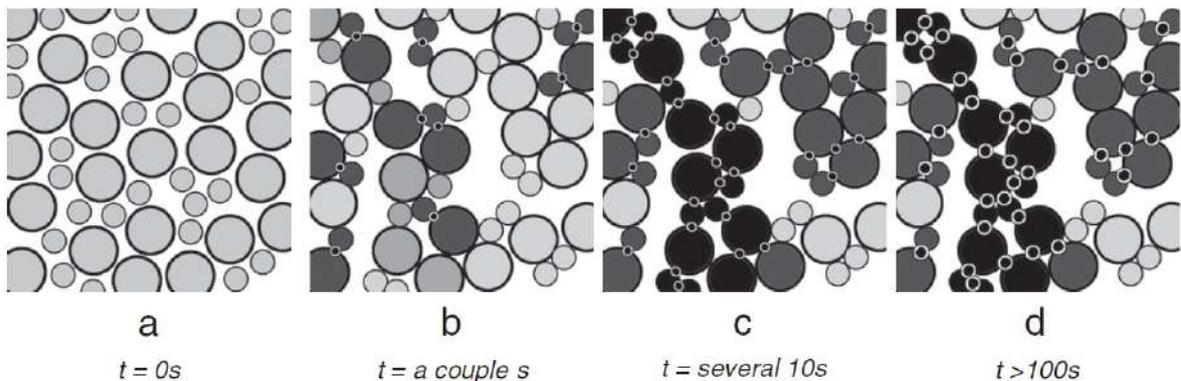


FIGURE II.3 – Réseau de particules de ciment en interaction pendant la période dormante (a) fin du mélange, (b) Quelques secondes après la fin du mélange, (c) ponts de CSH formant un réseau rigide percolé dans le matériau, (d) Le module d’élasticité du mélange augmente à mesure que la taille des ponts CSH (points noirs et blancs) augmente (Roussel, 2012)

Grâce à une analyse détaillée du comportement macroscopique d’une pâte, Roussel a montré qu’il existe deux types de déformation critique liés aux phénomènes physiques et chimiques. La plus grande déformation critique peut être associée au réseau d’interactions colloïdales entre les particules de ciment alors que la plus petite déformation critique peut être associée aux hydrates précoces, principalement le CSH qui se forment préférentiellement aux points de contact entre les grains de ciment Figure II.4.

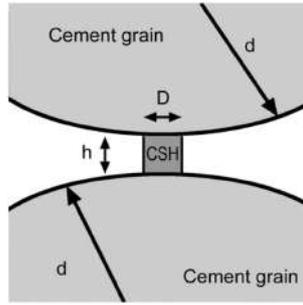


FIGURE II.4 – Pont de CSH entre deux grains de ciment (Roussel, 2012)

## Phase II

Le système entre dans une période de "latence" appelée induction ou période dormante. Dans cette période les processus initiés au cours de l'étape antérieure se poursuivent tout au long de la période d'induction traduit par la diminution du flux thermique et des changements dans la conductance électrique pendant quelques heures.

### II.1.3 Description physique du seuil

La pâte de ciment peut être considérée comme une suspension purement colloïdale. Les particules de ciment sont soumises aux forces d'attraction et à des forces électrostatiques. Trois types de forces déterminent le comportement rhéologique des suspensions colloïdales : les forces browniennes ; les forces colloïdales, telles que les forces électriques statiques et les forces de van der Waals ; et les forces hydrodynamiques se produisant pendant la sédimentation ou le mélange (Yang et al., 1997). Lors de l'écoulement d'une pâte de ciment, chaque granulat de ciment entraîné par l'eau est gêné dans son mouvement par les granulats voisins et l'origine du seuil est à la fois de type frictionnelle, dominé par le mouvement des granulats et colloïdale s'il est dominé par le mouvement de l'eau.

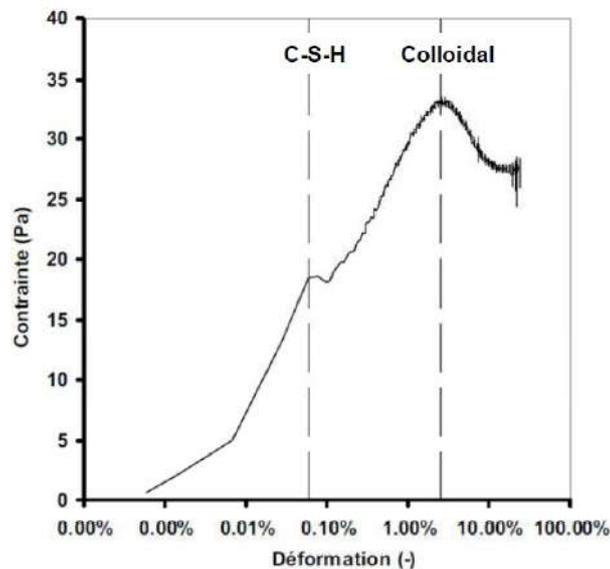


FIGURE II.5 – Contrainte en fonction de la déformation pour une pâte de ciment mesurée avec une vitesse de déformation faible (Roussel et al., 2012)

Le ciment au contact de l'eau produit diverses espèces ioniques, principalement de  $Na^+$ ,

$K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $OH^-$  avec une augmentation de pH de la solution à environ 13. Comme nous l'avons décrit, les réactions d'hydratation contribuent au seuil. La nucléation des hydrates à la surface de grains entraîne une augmentation des forces inter-particulaires en créant des ponts entre eux (C-S-H). Avec le temps d'hydratation, les ponts de C-S-H deviennent plus nombreux et plus rigides et ont un impact sur le seuil d'écoulement (Roussel et al., 2012).

La combinaison de ces types d'interactions déterminent le seuil d'écoulement décrit dans la Figure II.5. La première partie est attribuée à l'écoulement par la rupture des ponts d'hydrates (CSH principalement) entre particules. La seconde partie est due à la rupture des forces d'interaction colloïdale (Roussel et al., 2012).

Dans un système colloïdale, la force d'interaction totale  $G_{(h)}$  peut être obtenue à partir de la somme des forces de dispersion attractive  $F(\lambda, \bar{a})$  (pour les suspensions de ciment avec une taille de particules entre 0.5 et 50  $\mu m$ ), les forces électrostatiques  $F_{ES}$  et les forces stériques  $F_{Ste}$  (Houst et al., 2002) dû à la présence de polymères.

$$G_{(h)} = F_{Dis} + F_{ES} + F_{Ste} \quad (II.8)$$

Les propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires varient en fonction de la composition du matériau cimentaire. Le seuil et la viscosité augmentent à mesure que la taille maximale des particules augmente. En effet, par exemple, dans un béton typique, les granulats peuvent supporter des contraintes appliquées sans déformation, par conséquent, le seuil est plus grand. La viscosité plus élevée est en partie due au plus grand contact entre les particules (Banfill, 2006).

| Matériaux         | seuil    | Viscosité        |
|-------------------|----------|------------------|
| Water             | 0        | $1.01 * 10^{-3}$ |
| Pâte de ciment    | 10-100   | 1.01-1           |
| Mortier           | 80-400   | 1-3              |
| Béton autoplaçant | 50-100   | 20-100           |
| Béton             | 500-2000 | 50-100           |

TABLE II.3 – Propriétés rhéologiques de matériaux cimentaires (Banfill, 2006)

## II.2 Comportement rhéologique de matériaux cimentaires

### II.2.1 Introduction

Le fluide newtonien est un simple fluide où la viscosité dynamique ne dépend pas des contraintes qu'on applique au fluide. Ce modèle permet d'étudier l'écoulement de liquides tels que l'eau, les huiles, les gaz dans les conditions normales de température et de pression. Ce postulat est traduit par une relation contrainte-taux de cisaillement linéaire décrit comme :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \text{et} \quad \mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (II.9)$$

Où  $\tau$  est une contrainte de cisaillement ( $Pa$ ),  $\mu$  est une viscosité plastique ( $Pa.s$ ) et  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ). Dans un fluide newtonien la viscosité est absolue ou constante

quelle que soit l'intensité du cisaillement qui lui est appliqué. Donc, leur viscosité ne dépend pas du cisaillement appliqué. Lorsque son taux de cisaillement n'est pas directement proportionnelle à la force qu'on lui applique, la viscosité n'est pas constante. À chaque valeur du couple taux de cisaillement et contrainte de cisaillement correspond à une valeur de la viscosité  $\eta$  (viscosité apparente).

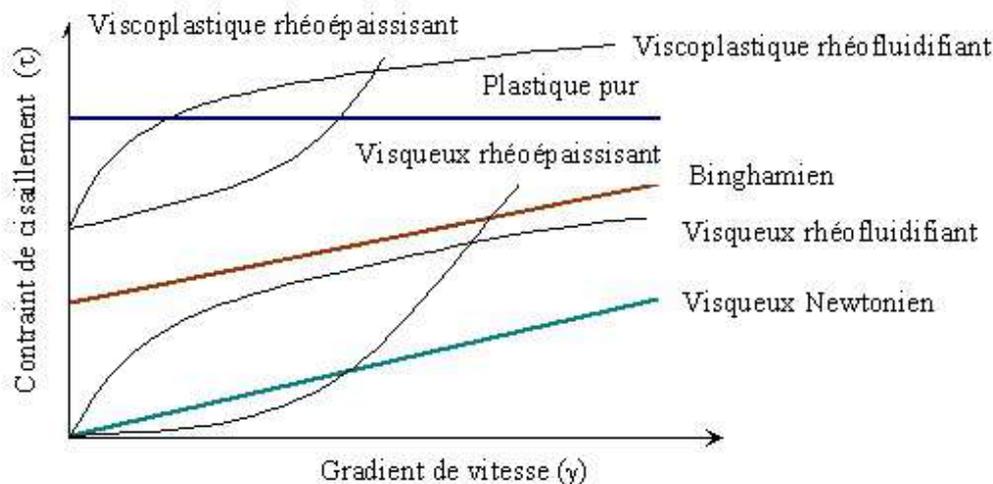


FIGURE II.6 – Fluides newtonien et non newtonien

D'un point de vue "rhéologique", le type de fluide se traduit par un type de comportement associé à un :

- Fluide visqueux, c'est à dire représentation d'un écoulement permanent sous son propre poids.
- Fluide viscoplastique, c'est à dire fluide visqueux au delà d'une certaine contrainte "seuil". Nous distinguons les fluides viscoplastiques rhéofluidifiants ou rhéoépaississants.
- Fluide plastique, c'est-à-dire en écoulement permanent lorsqu'un certain état de contrainte (seuil) est atteint. Nous distinguons des écoulements plastiques dilatants et contractants.

### *Thixotropie*

Un fluide ou matériau est dit thixotrope si sous contrainte (ou gradient de vitesse) constante, sa viscosité apparente diminue au cours du temps. Si la viscosité augmente nous l'appelons rhéopexie.

D'un point de vue physique, la thixotropie est le résultat d'une déstructuration du fluide en écoulement s'accompagnant d'une diminution provisoire de la barrière d'énergie potentielle associée aux interactions entre particules. D'après la Figure II.7b, quand le matériau est soumis à un taux de cisaillement suffisant, les amas de particules, de sa structure initiale (A), se défloclent jusqu'à arrêt de la sollicitation qui va entraîner la diminution de la viscosité apparente. Certains des floccs se reforment à un temps donné (C) et si le matériau est parfaitement thixotrope, il reprend sa viscosité initiale.

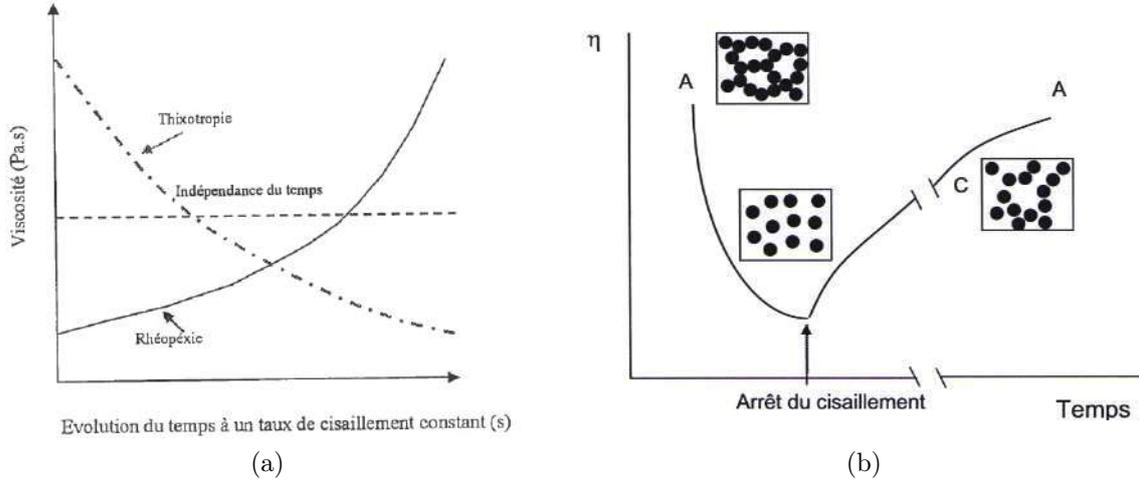


FIGURE II.7 – (a) Variation de la viscosité de différents matériaux (b) variation de la viscosité d'un système thixotrope sous l'influence d'une contrainte de cisaillement maintenue constante (Kaci, 2008)

## II.2.2 Approche classique de comportement rhéologique

Le béton est un matériau multiphasique considéré comme un fluide non-newtonien. C'est un suspension concentré qui a un seuil de cisaillement dû au frottement entre les granulats et les particules du ciment, pour lequel une contrainte minimale  $\tau_0$  est nécessaire afin de provoquer leur écoulement. En dessous du seuil de cisaillement le béton se comporte comme un solide et au-dessus du seuil, il se comporte comme un fluide. Pour trouver une relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement et décrire le comportement du béton nous avons plusieurs modèles mathématiques. Parmi ces modèles les plus utilisés nous avons : Bingham (Bingham, 1922), Casson et Herschel–Bulkley (Herschel and Bulkley, 1926).

### Bingham

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \quad [|\tau| > \tau_0] \quad (\text{II.10})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement ( $Pa$ ),  $\tau_0$  est le seuil de cisaillement ( $Pa$ ),  $\eta$  est la viscosité apparente ( $Pa.s$ ),  $\mu$  est la viscosité plastique ( $Pa.s$ ) et  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ).

### Casson

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu \dot{\gamma}} \quad \text{et} \quad \sqrt{\eta} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}} + \sqrt{\mu} \quad [|\tau| > \tau_0] \quad (\text{II.11})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement ( $Pa$ ),  $\tau_0$  est le seuil de cisaillement ( $Pa$ ),  $\eta$  est la viscosité apparente ( $Pa.s$ ),  $\mu$  est la viscosité plastique ( $Pa.s$ ) et  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ).

## Herschel Bulkley

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad \text{et} \quad \eta = K[\dot{\gamma}]^{n-1} + \tau_0[\dot{\gamma}]^{-1} \quad [|\tau| > \tau_0] \quad (\text{II.12})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  est le seuil de cisaillement (Pa),  $\eta$  est la viscosité apparente (Pa.s),  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ),  $K$  est l'indice de consistance et  $n$  est l'indice de puissance.

Pour les bétons traditionnels nous utilisons souvent la loi de Bingham qui décrit une variation linéaire de la courbe d'écoulement, qui est à la fois un modèle de type Herschel-Bulkley (Herschel) avec  $n=1$  (Haraldsson and Elvar, 2011). Alors que le modèle de Bingham présente une relation linéaire parfaite entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation. Le modèle de Casson utilise les mêmes paramètres que le modèle de Bingham mais s'exprime avec un comportement non linéaire. Le modèle Herschel Bulkley est appliqué sur des fluides avec un comportement non linéaire et il peut être utilisé pour décrire une variation linéaire de la courbe d'écoulement avec  $n = 1$ . C'est une méthode pratique pour le béton traditionnel. Il est considéré comme un modèle précis puisque son équation à trois paramètres ajustables (Pevere Guibaud, 2006). Selon Larrard (Larrard et al., 1998), le comportement du béton frais est mieux décrit par le modèle de Herschel-Bulkley et ce modèle évite le problème de la contrainte négative rencontrée avec le modèle de Bingham (Tableau II.4). Les contraintes négatives sont liées à l'identification erronée des paramètres par lissage mathématique. Cela veut dire qu'il est difficile d'obtenir des paramètres intrinsèques et qu'il est nécessaire de faire attention lors des mesures mais aussi lors de l'interprétation. C'est pour cette raison qu'il faudrait par la suite identifier et fixer un seuil physique pour avoir une cohérence.

| Matériaux                  | Mélanges | modèle Bingham |              | modèle Herschel B. |      |      |                |
|----------------------------|----------|----------------|--------------|--------------------|------|------|----------------|
|                            |          | $\tau_0$ (Pa)  | $\mu$ (Pa.s) | $\tau_0$ (Pa)      | K    | n    | $\mu^*$ (Pa.s) |
| Béton à résistance normale | BO1C     | 1717           | 174          | 1804               | 111  | 1.23 | 156            |
|                            | BO1B'    | 1489           | 163          | 1599               | 86   | 1.33 | 140            |
|                            | BO1A     | 1219           | 160          | 1341               | 74   | 1.40 | 134            |
|                            | BO1A'    | 881            | 133          | 983                | 62   | 1.40 | 111            |
| Bétons à haute performance | BHP1A'   | 593            | 517          | 774                | 38.5 | 1.15 | 479            |
|                            | BHP1B    | 473            | 530          | 608                | 430  | 1.10 | 501            |
|                            | BHP1C    | 141            | 439          | 471                | 205  | 1.40 | 370            |
| Bétons auto-compactants    | BHP8C    | -452           | 1960         | 675                | 792  | 1.88 | 2956           |
|                            | BHP8B    | -373           | 879          | 457                | 269  | 1.73 | 795            |
|                            | BHP8A    | -147           | 488          | 385                | 132  | 1.70 | 376            |

TABLE II.4 – Paramètres du béton frais selon le modèle de Bingham et le modèle de Herschel Bulkley ( $\mu^*$  Viscosité plastique équivalent) (Larrard et al., 1998)

D'après la Figure II.8, on observe la variation des courbes selon le modèle utilisé. Pour le modèle Bingham et Casson, en utilisant les mêmes paramètres, nous trouvons différents comportements avec un rapport de viscosité apparent plus grand pour le modèle Casson. Concernant la variation de la viscosité, la viscosité diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. La viscosité apparente  $\eta$  est approximativement  $\tau/\dot{\gamma}$  qui tend vers l'infini quand  $\dot{\gamma}$  tend à zéro, et tend vers 0.5 quand  $\dot{\gamma}$  tend à l'infini. Pour le modèle Herschel Bulkley, la viscosité dépend beaucoup des trois paramètres ajustables utilisés.

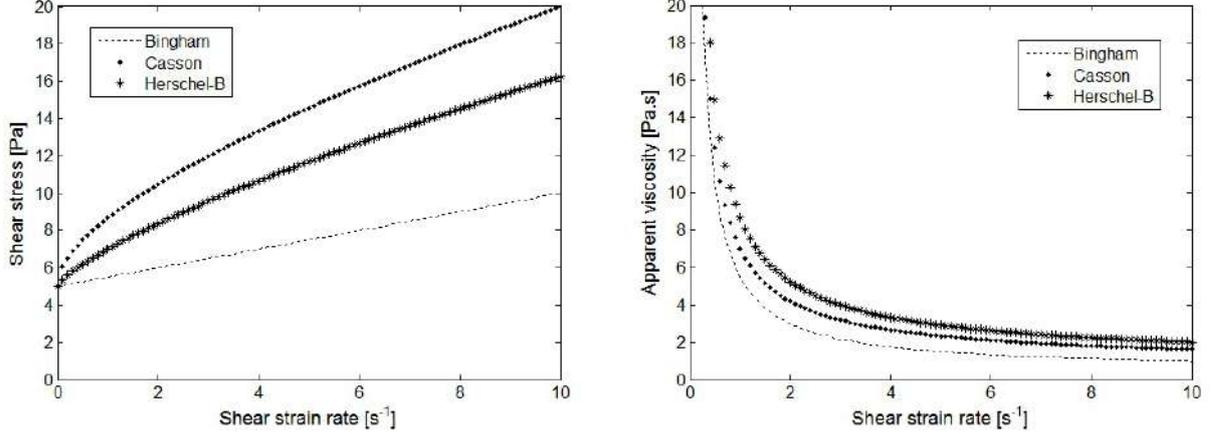


FIGURE II.8 – a) Contrainte de cisaillement et b) Viscosité apparente vs taux de cisaillement pour différents modèles classiques avec différents paramètres :  $\tau_0 = 5$ ,  $\mu=0.5$ ,  $n = 0.75$  et  $K=2$

### II.2.3 Approche modifiée par Papanastasiou

Tous les modèles classiques décrits peuvent décrire les écoulements simples à partir d'un seuil de cisaillement. Pour les champs de flux généraux, il est nécessaire de développer des techniques numériques pour pouvoir décrire le passage entre la zone avec seuil et celle sans seuil. Ceci peut être possible en introduisant dans les modèles un paramètre de continuité qui facilite le processus de résolution et produit pratiquement les mêmes résultats que les modèles classiques. Ceci dépend du bon choix des paramètres. Ainsi Papanastasiou (Papanastasiou, 1987) propose une régularisation exponentielle de l'équation de Bingham idéal, en introduisant un paramètre  $m$ , qui contrôle la croissance exponentielle de la contrainte. Ainsi la modification de Papanastasiou peut s'appliquer aux différents modèles qui deviennent un flux de cisaillement en 1D (Mitsoulis, 2007).

#### Bingham-Papanastasiou

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 - \exp(-m\dot{\gamma}) \right] + \mu\dot{\gamma} \quad \text{et} \quad \eta = \mu + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \left[ 1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|) \right] \quad (\text{II.13})$$

#### Casson-Papanastasiou

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} \left[ 1 - \exp(-\sqrt{m\dot{\gamma}}) \right] + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad \text{et} \quad \sqrt{\eta} = \sqrt{\mu} + \sqrt{\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}} \left[ 1 - \exp(-\sqrt{m\dot{\gamma}}) \right] \quad (\text{II.14})$$

#### Herschel-Bulkley Papanastasiou

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 - \exp(-m\dot{\gamma}) \right] + A\dot{\gamma}^n \quad \text{et} \quad \eta = K\dot{\gamma}^{n-1} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \left[ 1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|) \right] \quad (\text{II.15})$$

Où  $m$  est le paramètre de régularisation (si  $m = 0$  fluide newtonien, si  $m = \infty$ , fluide idéal). La modification de Papanastasiou peut être appliquée aux différents modèles (Bingham, Casson ou Herschel Bulkley) et est valable pour toutes les régions, à la fois avec et sans seuil.

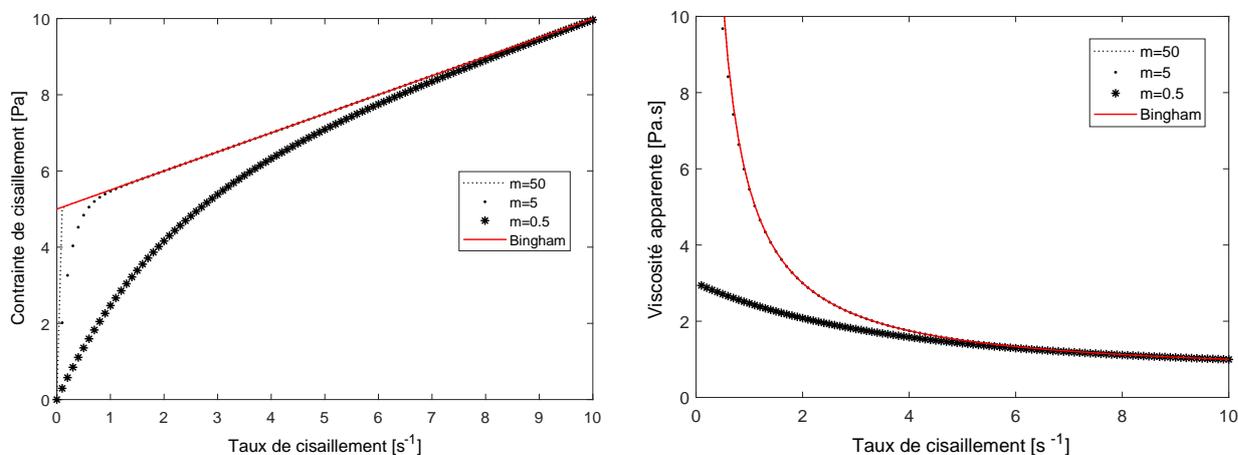


FIGURE II.9 – Modèle de Bingham-Papanastasiou pour différentes valeurs de  $m$ , avec  $\tau_0 = 5$  et  $\mu=0.5$

Comme nous le montrons dans la Figure II.9 pour le modèle Bingham Papanastasiou, à faible taux de cisaillement la contrainte évolue rapidement mais au-delà de la limite d'élasticité (seuil) la contrainte évolue lentement et linéairement avec une viscosité constante. Si  $m$  tend vers l'infini l'écoulement devient un fluide de type Bingham idéal tandis que si  $m = 0$ , le fluide devient un fluide newtonien. Pour le modèle Casson Papanastasiou (Figure II.10), si  $m$  tend vers l'infini l'écoulement devient un fluide de type Casson idéal tandis que si  $m = 0$ , le fluide devient un fluide sans seuil. Pour le modèle de Herschel Bulkley Papanastasiou (Figure II.11), si  $m$  tend vers l'infini l'écoulement devient un fluide de type Herschel idéal tandis que si  $m = 0$ , le fluide devient un fluide sans seuil.

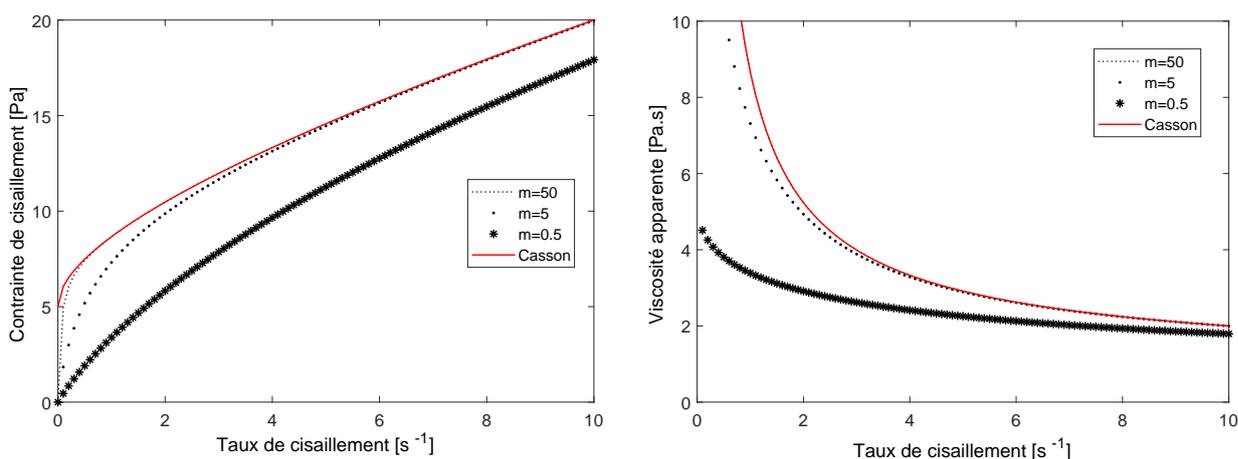


FIGURE II.10 – Modèle de Casson-Papanastasiou pour différentes valeurs de  $m$  avec  $\tau_0 = 5$  et  $\mu=0.5$

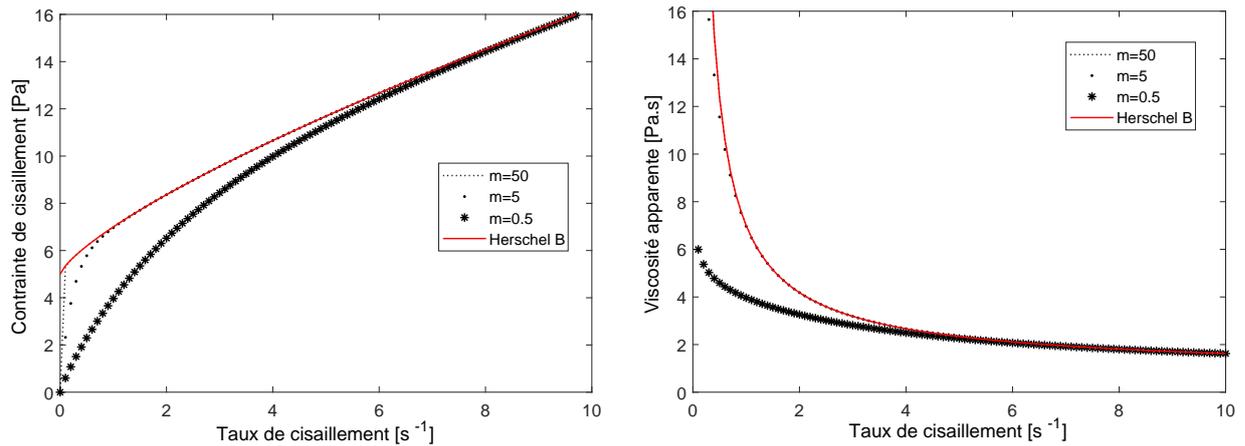


FIGURE II.11 – Modèle de Herschel Bulkley-Papanastasiou pour différentes valeurs de  $m$  avec :  $\tau_0 = 5, n = 0.75$  et  $K=2$

## II.3 Erreurs de mesure du comportement rhéologique des matériaux cimentaires

La rhéologie est un outil complexe et de haute qualité pour décrire le comportement d'un matériau, en particulier pour un matériau composite complexe comme le béton. De nombreuses erreurs ou inexactitudes dans les mesures et l'interprétation des données peuvent se produire, conduisant à des conclusions erronées. Donc, la mesure des propriétés rhéologiques de ces matériaux n'est pas une tâche aisée. Des précautions importantes doivent être prises avant, pendant et après les mesures. Les mesures sur les pâtes de ciment posent un certain nombre de difficultés en raison du : (a) grand nombre de particules, avec des tailles autour de la limite entre les particules colloïdales et non colloïdales. Les matériaux colloïdaux sont soumis à des interactions entre particules (dispersion de Van der Waals et les forces de répulsion électrostatique). (b) Les pâtes subissent une réaction chimique avec le temps, modifiant les propriétés rhéologiques. (c) Une majorité des adjuvants chimiques développés sont conçus pour modifier les propriétés du milieu de suspension, les forces d'interaction entre les particules, ou pour modifier la vitesse à laquelle la réaction chimique se produit (Feys et al., 2017). Par exemple, nous pouvons observer l'évolution dans le temps du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique selon la date de production du ciment.

Dans cette section, nous allons mentionner les principales sources d'erreurs de mesure ou d'interprétation (Feys et al., 2017)(Wallevik et al., 2015).

### a. Conditions d'équilibre

Pour les pâtes de ciment, considérées comme des matériaux thixotropes, il existe une structure d'équilibre à chaque vitesse de cisaillement. Si aucun équilibre n'est atteint à chaque taux de cisaillement, la contrainte peut être sous-estimée ou surestimée, ce qui pourrait conduire à une évaluation incorrecte de la non-linéarité de la courbe d'écoulement.

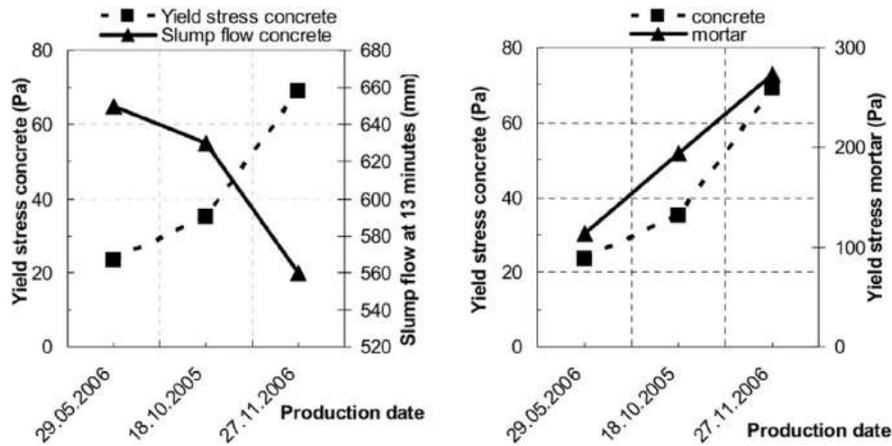


FIGURE II.12 – Exemple de variation d'affaissement et du seuil de cisaillement du mortier et du béton avec les changements dans la date de production du ciment (Wallevik et al., 2015)

## b. Largeur de l'entrefer

Pour assurer un cisaillement uniforme, la largeur de l'entrefer doit être faible ( $R_i/R_o$  environ de 0,99). Les plus grosses particules de ciment (environ  $100 \mu m$ ) peuvent être coincées entre des espaces petits et perturber l'écoulement laminaire homogène.

## c. Erreurs dues à l'écoulement à bouchon ("plug flow")

L'écoulement à bouchon est directement lié à la contrainte seuil du matériau. Comme la contrainte de cisaillement dépend de  $1/r^2$  ( $r$  est le paramètre radial), il se peut qu'une partie du matériau dans un rhéomètre à cylindres concentriques ne soit pas cisailée, lorsque la contrainte de cisaillement est inférieure à la contrainte seuil à une distance donnée du centre du rhéomètre. Ne pas corriger l'écoulement à bouchon pendant les essais rhéologiques peut conduire à une conclusion erronée de la présence d'une fluidification par cisaillement, à une sous-estimation de la contrainte seuil et à une surestimation de la viscosité plastique.

## d. Équations de transformation

Les rhéomètres enregistrent en tant que données, le couple et l'angle de déviation en fonction du temps. Tout autre paramètre est habituellement calculé automatiquement par le rhéomètre, sur la base des équations de transformation dans le logiciel. Mais les calculs du taux de cisaillement dans les cylindres concentriques et ceux de la contrainte de cisaillement dans les plateaux parallèles sont complexes. Par conséquent, cette transformation simple n'est pas complètement précise.

## e. Glissement, migration de particules et ségrégation

La migration des particules induite par le glissement et le cisaillement est un phénomène difficile à évaluer. La migration provoque un appauvrissement des particules dans les zones présentant les taux de cisaillement les plus élevés. De plus, un glissement peut se produire lorsque le frottement entre le plateau et l'échantillon est insuffisant pour surmonter

les contraintes appliquées. Par conséquent, une couche avec moins de particules est créée, invalidant ainsi les mesures. Les stratégies classiques pour éviter le glissement et la migration des particules consistent à appliquer une rugosité appropriée à la géométrie de mesure, soit en utilisant des surfaces dentelées, soit des surfaces sablées soit du papier de verre. Une autre stratégie consiste à effectuer la mesure aussi rapidement que possible.

## II.4 Paramètres influant sur la rhéologie du béton frais

### a. Compositions du béton

De nombreux travaux ont été réalisés sur l'effet de la composition du béton sur son seuil de cisaillement et sa viscosité. Lesquels ont permis de créer des rhéographes. Un rhéographe est le résultat d'une recherche pour examiner l'effet de différents changements sur la rhéologie du béton dû à l'eau ajoutée, à l'air entraîné, aux superplastifiants (SP) et aux fumées de silice (SF) utilisés dans un mélange du béton, ainsi que l'influence de la forme et quantité des granulats (Hu and Wang, 2011)(Figure II.13).

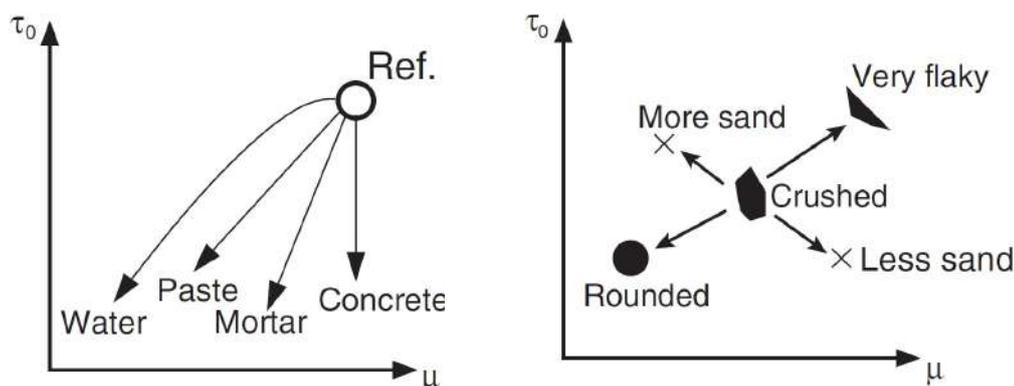


FIGURE II.13 – Présentation des rhéographes seuil de cisaillement vs viscosité des pâtes de ciment, mortiers et bétons : avec l'ajout de SP (gauche) et effet de la forme des granulats et la quantité de sable (droite) (Haraldsson and Elvar, 2011).

### *Rapport E/C*

Dans la plupart des études, le rapport E/C a une influence sur les propriétés rhéologiques des bétons. D'après Banfill (Banfill, 2006), lorsque le rapport E/C augmente, les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique du béton diminuent (Figure II.14).

### *Granulats*

Le seuil de cisaillement est déterminé par le nombre et la nature des contacts entre les grains de la matrice cimentaire. La phase granulaire et ses interactions avec la pâte ont une influence sur l'écoulement des bétons. La variation de la concentration de granulats entraîne deux phénomènes. À faible concentration des granulats dans la matrice, l'écoulement du béton est amélioré quand la densité des granulats est supérieure à la densité de la pâte de ciment et freinée si la densité des granulats est inférieure. Si la concentration de granulats augmente,

l'écoulement du béton est freiné. La diminution d'écoulement dépend de la forme de granulats. Les granulats sphériques facilitent l'écoulement par rapport aux granulats concassés (Haraldsson and Elvar, 2011).

### Adjuvants

Les adjuvants jouent un rôle important sur la rhéologie des bétons, par exemple, l'agent entraîneur d'air diminue le seuil de cisaillement et la viscosité, ainsi les plastifiants et super-plastifiants réduisent le seuil de cisaillement, mais dans le cas de la viscosité les avis sont variables (M. and C., 1977).

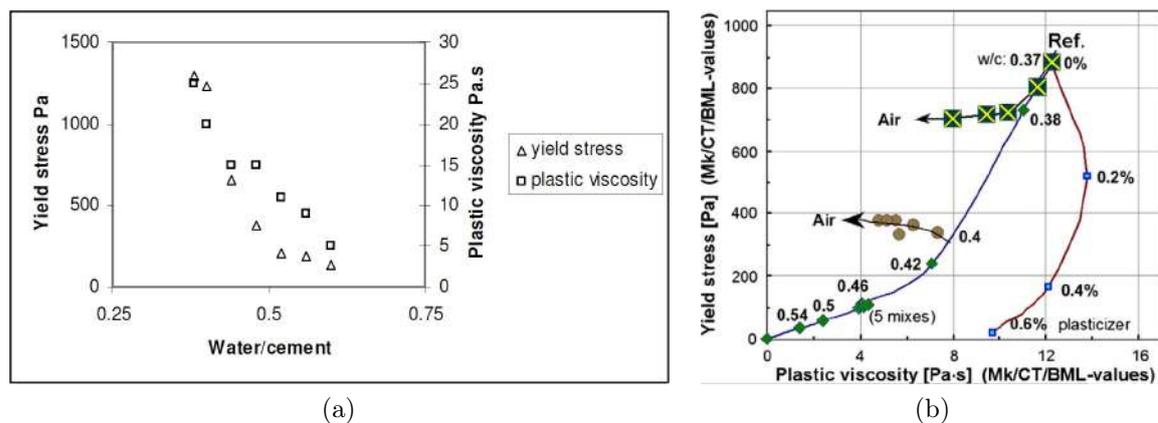


FIGURE II.14 – a) Effet du rapport E/C sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons frais. b) Effet de l'eau, l'air et le plastifiant sur le seuil et la viscosité des mortiers(Haraldsson and Elvar, 2011).

### b. Type de malaxage

Selon Wallevik (Haraldsson and Elvar, 2011), le type de malaxeur a une influence très importante sur le comportement rhéologique du béton. Les échantillons testés ont été des Bétons Autoplaçant (BAP) mélangés avec trois malaxeurs de capacités différentes pour trois mélanges désignés comme MC05, MC06 et MC19. les malaxeurs sont le mélangeur à tambour (Drum mixer), le mélangeur Maschinenfabrik Gustav Eirich de 50 litres et un mélangeur Maschinenfabrik Gustav Eirich 150 litres. Selon la publication, environ 25 litres de béton sont mélangés dans le mélangeur à tambour, 40 litres dans le mélangeur Gustav Eirich 50 et 100 litres dans le mélangeur Gustav Eirich 150. L'auteur précise que la vitesse de rotation appliquée pendant le mélange est plus importante pour le mélangeur de 150 l par rapport au mélangeur de 50 l. Les résultats sur l'influence de propriétés rhéologiques selon le type du malaxeur sont présentés dans la Figure II.15

Selon la Figure II.15, le mélangeur Gustav Eirich de 150 litres donne la viscosité plastique la plus faible de tous les mélanges. C'est-à-dire que lorsque la taille du mélangeur augmente, la viscosité plastique diminue.

D'autre part, l'influence du mélange sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment a été étudiée par (David A. Williams, 1998). Les pâtes de ciment ont été cisailées à une vitesse constante dans un rhéomètre, et puis soumises à des vitesses de cisaillement croissantes et

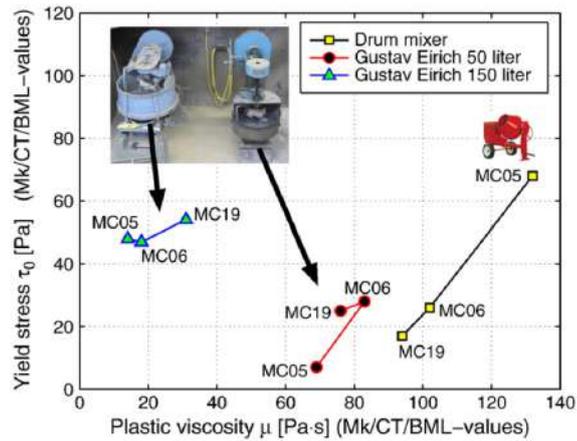


FIGURE II.15 – Influence du type de malaxeur sur la rhéologie de béton (Haraldsson and Elvar, 2011)

décroissantes. Six méthodes sont utilisées pour mélanger les pâtes de ciment. Mélanges à la main pendant 15 secondes, un mélangeur planétaire Hobart, un mélangeur à cisaillement élevé Ross et une bétonnière à tambour basculant pour un béton. Les résultats de la variation de la viscosité selon la méthode sont affichés dans la Figure II.16

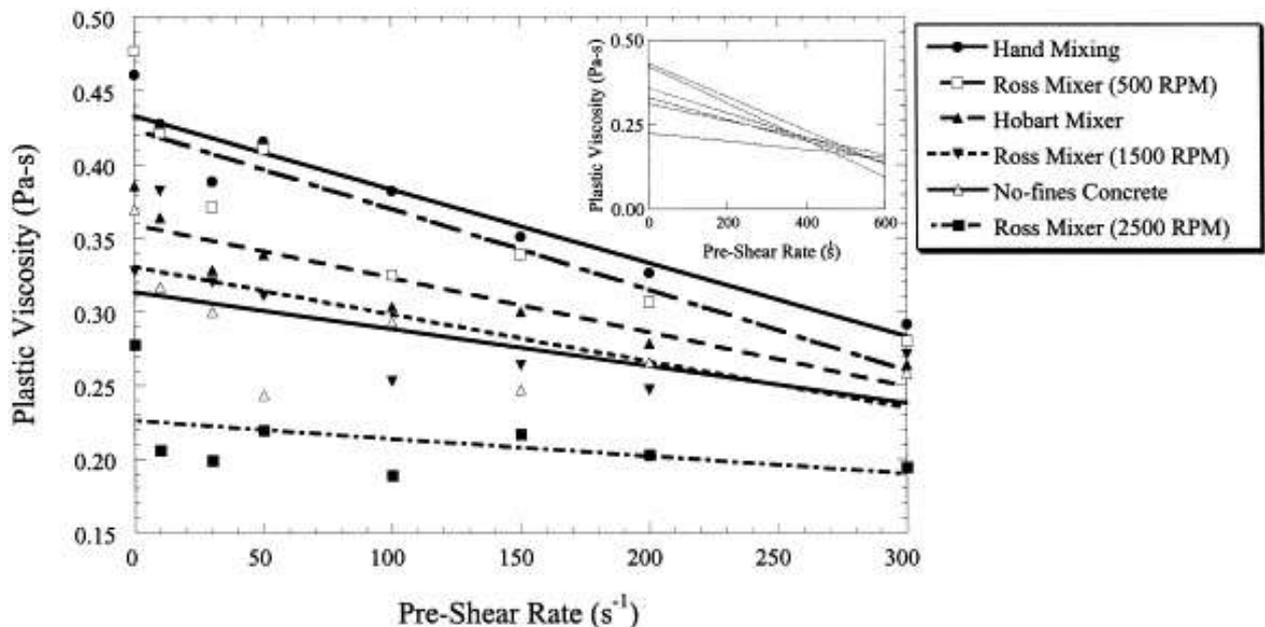


FIGURE II.16 – Viscosité plastique en fonction du taux de pré-cisaillement pour différentes techniques de mélange (David A. Williams, 1998).

Les lignes optimales de viscosité plastique extrapolées convergent à un taux de cisaillement d'environ  $490s^{-1}$ . Cela signifie qu'à un taux de cisaillement de  $490s^{-1}$ , peu importe le type de mélange, nous obtiendrons la même viscosité. A partir de cette valeur, nous utiliserons un taux de cisaillement de  $500s^{-1}$  (arrondi) dans nos essais rhéologiques.

### c. Type de rhéomètre

De la même manière, en fonction du type de rhéomètre utilisé, ceux-ci généreront des valeurs différentes des propriétés rhéologiques du béton, telles que détaillées par Banfill

(Figure II.17).

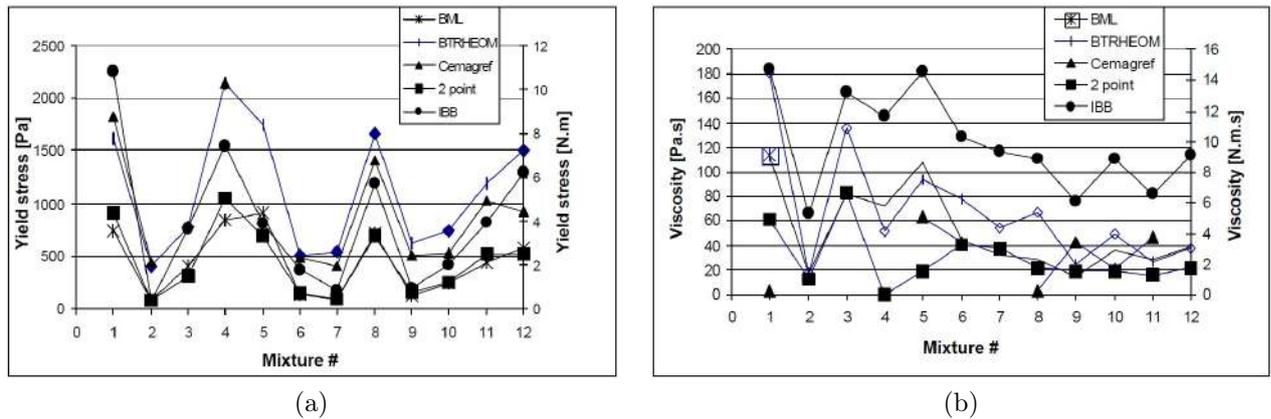


FIGURE II.17 – Comparaison des seuils d’écoulement (a) et de la viscosités (b) mesurées avec différents type de rhéomètres (Banfill, 2006)

## II.5 Techniques de mesures expérimentales de l’écoulement

### a. Méthodes d’essai empiriques

Au cours du temps, des méthodes d’essais empiriques de différents types et qualités ont été développées et utilisées pour donner une description rhéologique (ou d’indication) de comportement du béton frais. Le test empirique le plus connu, le plus ancien et le plus utilisé actuellement est le test dit d’affaissement. L’appareil d’essai est généralement associé à Abrams (Abrams, 1919), mais on pense que son utilisation a d’abord été rapportée par Chapman (1913) (Bartos et al., 2002)

#### *Essai au cône d’Abrams*

L’essai d’affaissement au cône d’Abrams est un des essais les plus utilisés sur le béton frais pour déterminer sa consistance. Les affaissements sont compris entre 1 cm et 21 cm et décrit par la norme EN 12350-2. En dehors de ces limites, l’essai de l’affaissement peut être inadapté. Cet essai ne s’applique pas si la dimension maximale du granulat est supérieure à 4 cm. L’essai au cône d’Abrams, s’effectue en disposant du béton frais dans un cône tronconique qu’on déversera ensuite sur un support afin de constater son affaissement. Un béton est considéré comme ferme si son affaissement est inférieur à 3 cm. Le béton est considéré comme très fluide si son affaissement est supérieur à 16 cm. Elles correspondent à une caractéristique du béton lorsqu’il est encore frais. Ces différentes classes permettent de mesurer la fluidité du béton et d’ajuster le dosage en fonction des performances recherchées. L’ouvrabilité est une caractéristique à ne pas négliger, surtout lorsqu’il s’agit de la mise en place du béton sur un chantier. Par conséquent, la classe de consistance du béton varie en fonction du dosage.



FIGURE II.18 – cône d'Abrams

### *Essai de l'écoulement à la boîte en L*

L'essai de la boîte en L ou L-box, est un essai réalisé sur le béton autoplaçant frais pour évaluer sa potentielle ségrégation dynamique et la détermination du taux de remplissage conforme à la norme NF EN 12350-10. L'essai de la boîte en L permet d'évaluer l'aptitude de béton auto-plaçant à s'écouler dans un milieu confiné et d'estimer les risques de blocage de gros granulats au niveau des armatures lors de la mise en œuvre d'un béton armé. Un volume donné de béton frais s'écoule horizontalement à travers les espaces entre les barres d'armature lisses verticales. Les hauteurs du niveau de béton dans la partie verticale ( $H_1$ ) et à l'extrémité de la partie horizontale ( $H_2$ ) sont mesurées et le rapport  $H_2/H_1$  est déterminé. Ce rapport constitue une mesure de la capacité d'écoulement ou de blocage du béton auto-plaçant. Le taux de remplissage  $PL$  est calculé à partir de l'équation suivante :

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (\text{II.16})$$

Où  $H_1$  est la hauteur moyenne du béton dans la partie verticale de la boîte et  $H_2$  est la hauteur moyenne du béton à l'extrémité de la partie horizontale de la boîte.

### *Essai d'étalement*

Cet essai nous permet de déterminer la consistance du béton frais en mesurant son étalement sur un plateau plan soumis à des chocs selon la norme 12350-5. Pour réaliser cet essai, nous avons besoin d'une table à choc et un cône d'un diamètre de base de 200 mm, un diamètre de sommet de 130 mm et une hauteur de 200 mm. L'essai se déroule en plusieurs étapes : premièrement, la table est mouillée avec de l'eau de gâchage, ensuite le cône est placé au centre de la table et rempli avec du béton frais en deux fois (chaque couche est tapotée 10 fois). Le cône est retiré après trente secondes d'attente et le béton s'étale sur la table. La table est levée à une hauteur de 40 mm puis laissée tombée 15 fois pour étaler encore plus le béton. Finalement on mesure le diamètre le plus grand ainsi que le diamètre qui lui est perpendiculaire. L'étalement est la moyenne de ces deux diamètres.

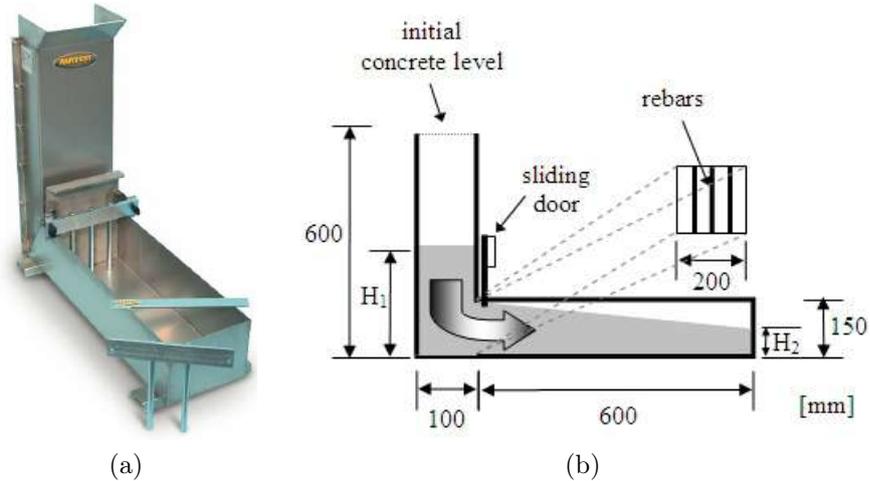


FIGURE II.19 – Boîte en L



FIGURE II.20 – Essai d'étalement : démoulage (gauche) et mesure des diamètres (droite)

## b. Rhéomètre

La rhéométrie est une quantification expérimentale des propriétés rhéologiques des matériaux. Les rhéomètres conventionnels utilisés se répartissent selon leurs modes de fonctionnement en deux catégories : les géométries rotatives (cylindres coaxiaux, cône-plan, plan-plan ou plan parallèles) et les conduites (capillaire, canal à surface libre). Nous utilisons les rhéomètres capillaires pour des fluides très peu visqueux. Pour des produits un peu plus visqueux, nous utilisons les géométries à rotation.

Lors de l'utilisation d'un rhéomètre, les valeurs expérimentales dans les suspensions peuvent être erronées en raison des effets perturbateurs de la mesure. Par conséquent, il est important de repérer les valeurs aberrantes et de les éliminer ou de reprendre l'expérience à son début pour s'assurer de la validité des résultats. Ceci est d'autant plus vrais lorsque l'on utilise ces données directement via les outils informatiques proposés par défaut avec les rhéomètres (Coussot and Ancy, 1999). Les effets perturbateurs expérimentaux de la rhéométrie peuvent être par exemple dus aux dimensions du rhéomètre, le glissement aux parois dû à l'absence d'interactions particulières entre le fluide et la paroi, l'évaporation de la mélange, la sédimentation ou la ségrégation.

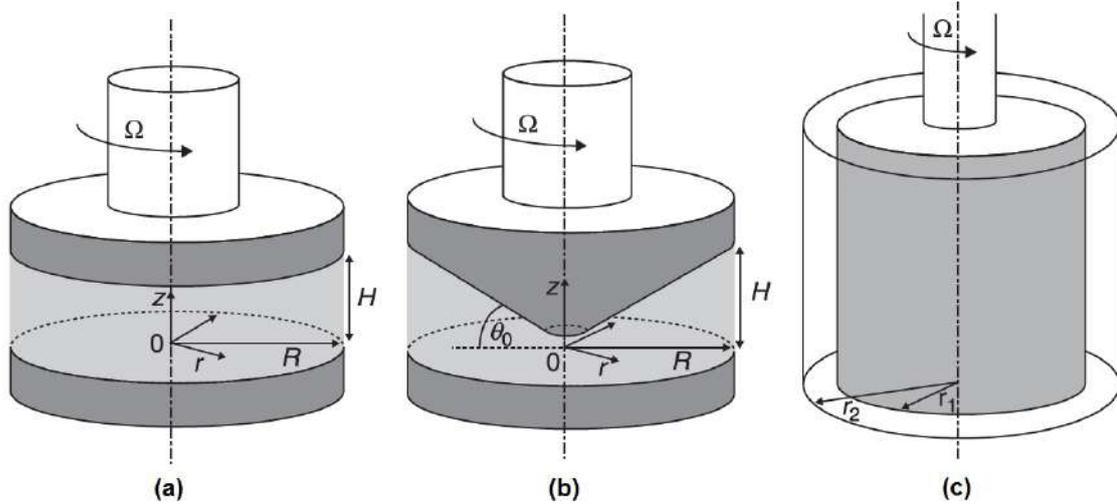


FIGURE II.21 – Rhéomètres à rotation : a) Plan-Plan, b) Cône-Plan et c) Couette (Roussel, 2012)

### *Rhéomètre plan-plan*

Cette géométrie est composée des deux disques coaxiaux en rotation relative (Figure II.21a). Dans une géométrie à plaques parallèles, le matériau est placé entre deux disques de même axe de symétrie et de même rayon  $R$ , séparés par une distance  $H$  (appelée "gap" ou entrefer). La plaque de fond est fixée et le cisaillement est imposé en faisant tourner la plaque supérieure autour de l'axe de symétrie à la vitesse  $\Omega$ , ce qui entraîne un couple  $T$ . La description de l'écoulement du fluide confiné est compliquée car la contrainte et le taux de cisaillement ne sont pas uniformes en tous points de l'entrefer, ils dépendent de la distance qui sépare le point sur lequel on fait les mesures de l'axe de rotation. Pour les matériaux caractérisés par une relation contraintes et taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$ , le taux de cisaillement ne dépend que du rayon  $r$  avec une condition limite sans glissement sur les deux surfaces de la plaque, la vitesse à un rayon  $r$  est  $\Omega r$  sur la plaque supérieure et zéro sur la plaque inférieure, ce qui conduit à :

$$\dot{\gamma}(r) = \frac{\Omega r}{H} \quad \tau(R) = \frac{2T}{2\pi R^2} \left[ 3 + \frac{\Omega \partial T}{T \partial \Omega} \right] \quad (\text{II.17})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement ( $Pa$ ),  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ),  $R$  est le rayon des disques,  $r$  est le rayon dans un point donné,  $T$  est le moment d'une force ( $N.m$ ),  $\Omega$  est la vitesse de rotation et  $H$  est la distance entre les plaques (entrefer).

Des plaques parallèles peuvent alors être utilisées pour des suspensions dont la taille des éléments est de  $200 \mu m$  au maximum (par exemple des mortiers avec des particules fines) (Roussel, 2012). L'inconvénient majeur de cette géométrie réside dans la variation du gradient de vitesse entre une valeur nulle près de l'axe et une valeur maximum à la périphérie.

### *Rhéomètre cône-plan*

Dans une géométrie de cône-plan, le matériau est placé entre un cône et un disque de même axe de symétrie et de même rayon  $R$  (Figure II.21b). La pointe du cône est tronquée pour éviter les frottements entre le cône et la plaque de fond. La pointe virtuelle du cône est

supposée toucher la plaque. La plaque de fond est fixée et le cisaillement est imposé en faisant tourner le cône autour de l'axe de symétrie à une vitesse  $\Omega$ , ce qui donne un couple  $T$ . Dans les essais, le matériau est placé sur le disque ensuite le cône est progressivement rapproché à la distance appropriée. Ensuite, à partir de la relation couple/vitesse de rotation, on peut simplifier le comportement de  $\tau$  grâce à des équations fiables qui sont vraies quelle que soit la loi de comportement du matériau :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\Theta} \quad \tau = \frac{3T}{2\pi R^3} \quad (\text{II.18})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement ( $Pa$ ),  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ),  $R$  est le rayon des disques,  $T$  est le moment d'une force ( $N.m$ ),  $\Omega$  est la vitesse de rotation et  $\Theta$  est l'angle.

Cette géométrie ne peut pas être utilisée pour de nombreuses suspensions ; il peut être utilisé pour des suspensions colloïdales dont la taille des éléments est de quelques microns au maximum.

### *Rhéomètre couette*

Dans cette géométrie, le matériau est placé entre deux cylindres coaxiaux (Figure II.21c). Le cylindre extérieur est fixé et le cisaillement est imposé en faisant tourner le cylindre interne de hauteur  $H$  autour de l'axe de symétrie à une vitesse  $\Omega$ , ce qui entraîne un couple  $T$ . La distance entre le cylindre interne et le fond de la coupe (cellule de mesure) est généralement beaucoup plus grande que la taille de l'entrefer pour assurer que la contribution au cisaillement au fond soit aussi négligeable que possible, ces effets finaux peuvent être corrigés avec des procédures appropriées si nécessaire. Avec ce type de géométrie nous pouvons étudier des matériaux très fluides qui ne peuvent pas rester au sein des géométries planes par exemple. Étant donné la taille relativement importante de l'espace de mesure, sur toute hauteur du cylindre, nous pouvons travailler avec des produits contenant des particules de taille relativement importantes. Des équations approximatives peuvent être utilisées en fonction du rayon interne et externe :

$$\dot{\gamma} = \frac{r_1 \Omega}{r_2 - r_1} \quad \tau = \frac{T}{2\pi r_1^2 h} \quad (\text{II.19})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement ( $Pa$ ),  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ),  $r_1$  est le rayon interne,  $r_2$  est le rayon externe,  $T$  est le moment d'une force ( $N.m$ ),  $\Omega$  est la vitesse de rotation et  $h$  la hauteur du cylindre.

Le principal avantage des géométries Couette pour les fluides complexes est que l'entrefer peut être important. C'est donc la géométrie préférée pour les suspensions constituées de grosses particules telles que le béton frais. Cependant, à moins que le rayon du cylindre interne soit très grand, un large entrefer implique une répartition des contraintes de cisaillement très hétérogène qui pose le problème de la localisation de cisaillement et de la migration induite par cisaillement.

## Rhéomètre Vane ou ailettes

Dans cette géométrie, le cylindre interne du rhéomètre est remplacé par un outil à ailette, constitué de  $n$  lames fines centrées sur un axe mince (généralement 4 ou 6) (Barnes and Nguyen, 2001). Comparée au rhéomètre Couette des cylindres coaxiaux, il offre deux avantages principaux. Premièrement, il permet d'étudier des propriétés des matériaux structurés avec une perturbation minimale de la structure du matériau lors de l'insertion de l'outil. Deuxièmement, il évite le glissement de paroi (Saak et al., 2001) car le matériau cisailé dans l'interstice de la géométrie est cisailé par le (même) matériau qui est emprisonné entre les lames. Par conséquent, il est largement utilisé pour étudier le comportement des matériaux pâteux contenant de grosses particules tels que le béton frais.

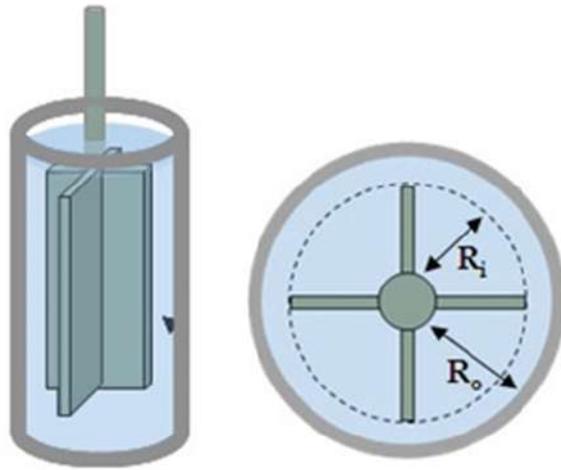


FIGURE II.22 – Rhéomètre à rotation : vane ou à ailette

## II.6 Conclusions

Comme nous l'avons vu dans cette partie, la rhéologie est un outil complexe. De nombreuses erreurs ou inexactitudes dans les mesures et l'interprétation des données peuvent se produire, conduisant à des conclusions erronées. Donc, la mesure des propriétés rhéologiques de ces matériaux n'est pas une tâche facile. Il y a plusieurs paramètres influençant la rhéologie du béton. En commençant par la variation des composants dans le béton, le type et la taille du malaxeur, le temps d'hydratation, le type de rhéomètre utilisé, le protocole de mesure utilisé ou encore les modèles mathématiques utilisés pour obtenir ses paramètres rhéologiques.

Le comportement du béton frais peut être décrit par des lois rhéologiques classiques. L'inconvénient de ces lois classiques est que ce sont des lois qui décrivent le comportement des matériaux cimentaires à partir d'un seuil d'écoulement. Nous ne pouvons pas décrire le passage d'une zone du seuil (écoulement nul ou considère comme solide) vers la zone d'écoulement. Pour décrire ce passage de la phase solide à la phase d'écoulement, Papanastasiou a introduit un nouveau terme dans les modèles classiques. Ce terme noté " $m$ " décrit la croissance exponentielle de la courbe seuil, jusqu'à l'obtention d'une croissance linéaire indiquant le passage à la phase d'écoulement.

Pour déterminer les propriétés rhéologiques de matériaux cimentaires à l'état frais, les

différents types de rhéomètre principalement à rotation sont disponibles, fréquemment utilisés pour dessiner des rheogrammes de contrainte de cisaillement en fonction de taux de cisaillement.

Dans les chapitre suivants nous allons commencer à développer les essais sur les pâtes de ciment et mortiers afin de déterminer dans un premier temps la variation de la teinte et de la rugosité en fonction du rapport E/C, et deuxièmement, la variation des propriétés rhéologiques en fonction du rapport E/C.

Deuxième partie

**PARTIE EXPÉRIMENTAL**

# Table des matières

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>III Variation de la teinte et de la rugosité des surfaces des matériaux cimentaires</b> | <b>49</b> |
| III.1 Méthodes et instruments d'essai . . . . .  | 49        |
| III.2 Variation de la teinte des surfaces . . . . .  | 53        |
| III.2.1 Pâtes de ciment . . . . .  | 53        |
| III.2.2 Mortier normalisé . . . . .  | 60        |
| III.2.3 Comparaison des résultats entre les pâtes de ciment et les mortiers . . . . .      | 68        |
| III.3 Conclusions . . . . .  | 70        |
| <b>IV Rhéologie expérimentale des matériaux cimentaires</b>                                | <b>73</b> |
| IV.1 Pâte de ciment . . . . .  | 73        |
| IV.1.1 Composition et préparations des pâtes de ciment . . . . .                           | 73        |
| IV.1.2 Masse volumique des pâtes de ciment . . . . .                                       | 74        |
| IV.1.3 Concentration de solides . . . . .  | 75        |
| IV.1.4 Distance entre deux particules de ciment . . . . .                                  | 75        |
| IV.1.5 Essais rhéologiques . . . . .   | 77        |
| IV.1.6 Variation de la rhéologie des pâtes en fonction du rapport E/C . . . . .            | 82        |
| IV.2 Mortier . . . . .   | 91        |
| IV.2.1 Composition et préparations des mortiers . . . . .                                  | 91        |
| IV.2.2 Masse volumique des mortiers frais . . . . .  | 91        |
| IV.2.3 Essais rhéologiques . . . . .   | 91        |
| IV.2.4 Variation de la rhéologie des mortiers en fonction du rapport E/C . . . . .         | 93        |
| IV.3 Conclusions . . . . .   | 102       |

---

# CHAPITRE III

## Variation de la teinte et de la rugosité des surfaces des matériaux cimentaires

Dans ce chapitre, nous étudierons expérimentalement la variation de la clarté et de la rugosité des surfaces des pâtes de ciment et des mortiers durcis en fabriquant plusieurs échantillons et en faisant varier le rapport E/C de formulation. Pour des raisons de répétabilité et méthodologiques (cf. Introduction), le type de ciment utilisé sera le CEM I 52.5 N fabriqué à Lumbres, pour tous les matériaux cimentaires étudiés. L'emploi d'un spectrocolorimètre et d'un microscope numérique nous permet de déterminer la variation de la clarté ainsi que la rugosité de surface sur des échantillons des pâtes de ciment et des mortiers. L'objectif de ce chapitre est en partie de déterminer la relation entre la clarté et le rapport E/C, et d'autre part, de déterminer la relation entre la rugosité d'une surface durcie et le rapport E/C dans le matériaux cimentaires. Dans nos expériences, nous décrirons également la variation de la porosité de surface des matériaux cimentaires en fonction de la variation du rapport E/C.

### III.1 Méthodes et instruments d'essai

#### a. Mesure au colorimètre ou spectrocolorimètre

Le colorimètre est un instrument de mesure de la couleur dont le principe est basé sur les valeurs tristimulus XYZ. Ils sont équipés de trois sondes simulant les réponses spectrales de l'observateur standard. Le concept des valeurs tristimulus XYZ s'appuie sur la théorie, que la perception des couleurs se fait selon trois composants perçus par les récepteurs de l'oeil. Les trois composant sont les couleurs primaires (rouge, vert et bleu) toutes les autres couleurs sont alors perçues par le mélange de ces trois couleurs. Les spectrocolorimètres sont des appareils sophistiqués dont les performances sont intermédiaires entre celles des colorimètres et des spectrophotomètres. Un spectrocolorimètre mesure la lumière réfléchie par un objet pour chaque longueur d'onde. Ces données sont ensuite affichées sur un graphique qui donne des informations plus détaillées sur la nature de la couleur de l'objet. Un objet absorbe une partie de la lumière qu'il reçoit et réfléchit le reste. Chaque objet absorbe et réfléchit différentes quantités de lumière à plusieurs niveaux du spectre. Ces différences d'absorption et de réflexion font que les couleurs des objets sont différentes (Minolta, 1994).

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) fondée à Berlin en 1913, est une organisation internationale dédiée à la lumière, l'éclairage, la couleur et les espaces de couleur.

| Paramètres | Valeur minimal | Valeur maximal |
|------------|----------------|----------------|
| L*         | 0 (noire)      | 100 (blanc)    |
| a*         | -60 (vert)     | +60 (rouge)    |
| b*         | -60 (bleu)     | +60 (jaune)    |

TABLE III.1 – Valeurs de la clarté et de paramètres chromatiques dans l'espace CIELab

La CIE a élaboré plusieurs systèmes de mesure de la couleur. L'espace de couleur le plus utilisé dans le monde entier pour déterminer la couleur est l'espace L\*a\*b\* conçu en 1976 et utilisé par les spectrorimètres. La classification des couleurs se fait en fonction de trois critères : la teinte (couleur), la clarté (luminosité) et la saturation (intensité) (Minolta, 1994).

L'espace L\*a\*b\*, appelé "CIELab", est utilisé pour mesurer la couleur des objets dans pratiquement tous les domaines. L\* désigne la clarté, tandis que a\* et b\* sont les coordonnées de chromacité qui indiquent la direction des couleurs : +a\* vers le rouge, -a\* vers le vert, +b\* vers le jaune et -b\* vers le bleu. La CIE a défini la clarté L\* à partir de la luminance lumineuse Y de la lumière produite par une source, relativement à la luminance lumineuse Y<sub>n</sub> du blanc pris comme référence (avec "n" définie comme neutre). Y est l'intensité lumineuse par unité de surface (candelas par mètre carré (cd/m<sup>2</sup>)). Le rapport Y/Y<sub>n</sub> est la luminance lumineuse relative. La luminosité prend alors une valeur comprise entre 0 et 100 (Tableau III.1) et peut être calculée d'après les formules suivant ((Sève, 2009)) :

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/2} - 16 \quad (\text{III.1})$$

$$a^* = 500 \left[ \left( \frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{III.2})$$

$$b^* = 200 \left[ \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left( \frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (\text{III.3})$$

où  $\frac{X}{X_n}$ ,  $\frac{Y}{Y_n}$  et  $\frac{Z}{Z_n} > 0,008856$

Lorsqu'une surface rugueuse (ex : béton) reçoit de la lumière, elle peut, totalement ou en partie :

- la transmettre : ce que font les objets transparents quand la lumière passe à travers ;
- l'absorber : lorsque les objets "gardent" la lumière et l'absorbent ;
- la diffuser : lorsque les objets "renvoient" dans toutes les directions la lumière. Cette lumière diffusée va être mesurée pour le spectrorimètre.

Pour mesurer la variation de la teinte de nos échantillons, nous allons utiliser le spectrorimètre Minolta CM-508i (Figure III.2), avec une source lumineuse à double faisceau incorporée assurant l'éclairage uniforme de l'objet pendant les mesures. Les données sont calculées en fonction de l'illuminant standard D<sub>65</sub> qui est la lumière du jour moyenne (comprenant la zone des ultraviolets). Quand un appareil mesure un échantillon, l'angle sous lequel la lumière incidente atteint l'objet coloré, et l'angle sous lequel cet objet est observé s'appelle la géométrie optique de mesure. Dans un système à éclairage dirigé avec une géométrie 45/0 par exemple, l'objet est éclairé sous une incidence de 45±2 degrés par rapport à la normale, et est mesuré à 0±10 degrés (Minolta, 1994).

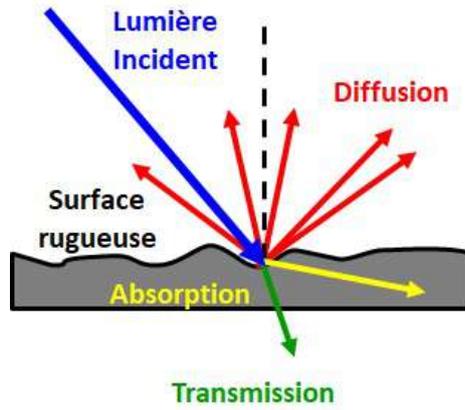


FIGURE III.1 – Diffusion, absorption et transmission d’une lumière incident



FIGURE III.2 – Spectrocolorimètre Minolta CM508i (ATILH)

Pour plus de détail par rapport à la couleur, voir annexe A.1.

### b. Caractérisation de la rugosité d’un parement de béton

Il existe de nombreuses méthodes et des paramètres pour déterminer la rugosité d’une surface. Selon la norme NF EN ISO 4287, nous pouvons utiliser la méthode des profils pour obtenir, par exemple : la moyenne arithmétique du profil ( $R_a$ ), la hauteur totale du profil ( $R_t$ ) ou encore la hauteur maximale du profil ( $R_z$ ). Dans notre cas, pour mesurer la rugosité des surfaces de matériaux cimentaires, nous utilisons le coefficient de surface développée (Siewczyńska, 2012) en pourcentage mesuré par le microscope numérique que nous allons utiliser ( $R_s$ ). Selon Izoret, la surface développée  $S_D$  correspond à la micro-topographie de la surface. Elle se définit comme la grandeur analogue à la surface spécifique Blaine d’une poudre.

$$R_s = \frac{S_m}{S_g} * 100 \quad (\text{III.4})$$

Où  $S_m$  est la surface spécifique mesurée.  $S_g$  est la surface géométrique ou l’aire orthogonale au plan (Figure III.3).

Pour mesurer l’état de surface de nos échantillons avec différents rapport E/C, nous utili-

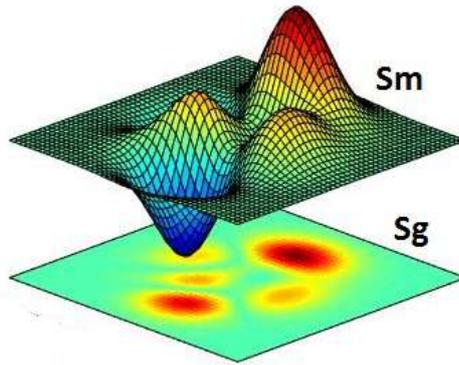


FIGURE III.3 – Représentation de la surface spécifique mesurée ( $S_m$ ) et de la surface géométrique ( $S_g$ )

sons le microscope numérique Keyence VHX-2000E du laboratoire Mécanique et Technologie de l'ENS de Cachan (Figure III.4). Le microscope numérique est une technologie de mesure et d'inspection équipée d'un dispositif de capture d'image, généralement un capteur CCD (Charge-Coupled Device) ou CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), se substituant à l'oeil humain. L'image capturée par la caméra s'affiche en temps réel sur un écran LCD intégré, capable de couvrir une plage de grossissement de 0,1x à 5000x. Ce système se révèle particulièrement utile en recherche et développement, contrôle qualité, analyse des défaillances et fabrication. Les limites géométriques de mesure du microscope sont décrites au Tableau III.2 selon l'objectif zoom utilisé. Dans notre cas, nous avons réalisé nos mesures avec un grossissement de 200x.

| Grossissement                |            | 100x | 200x | 300x | 5000x | 700x | 1000x |
|------------------------------|------------|------|------|------|-------|------|-------|
| Champ de vision ( $mm$ )     | Horizontal | 3,05 | 1,53 | 1,02 | 0,61  | 0,44 | 0,3   |
|                              | Vertical   | 2,28 | 1,14 | 0,76 | 0,46  | 0,33 | 0,23  |
|                              | Diagonal   | 3,81 | 1,90 | 1,27 | 0,76  | 0,54 | 0,38  |
| Distance de travail ( $mm$ ) |            | 25   |      |      |       |      |       |

TABLE III.2 – Grossissements selon l'objectif zoom à large plage VH-Z100R/Z100T à haute résolution du microscope numérique Keyence



FIGURE III.4 – Microscope numérique "Keyence" au LMT-Cachan

| Caractérisation chimique |                                |                                |      |     |                 |                  |                   |      |      |                 |       |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------------------|-------------------|------|------|-----------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | S-   | Cl-  | CO <sub>2</sub> | Autre |
| 20                       | 5                              | 3,2                            | 64,5 | 0,8 | 3,1             | 0,79             | 0,25              | 0,01 | 0,07 | 1,1             | 1,18  |

TABLE III.3 – Composition chimique du ciment CEM I

## III.2 Variation de la teinte des surfaces

### III.2.1 Pâtes de ciment

#### a. Matériaux et composition

La fabrication de plusieurs pâtes de ciment nous permet de déterminer l'influence de la quantité d'eau de formulation (rapport E/C) sur la rugosité ( $R_s$ ) et la clarté ( $L^*$ ) dans les surfaces durcies des pâtes de ciment au niveau du coffrage. Les échantillons sont élaborés en utilisant un ciment CEM I. Les caractéristiques chimiques du ciment que j'ai utilisé sont décrites dans le Tableau III.3. Au total 15 échantillons sont fabriqués dans un moule rectangulaire métallique normalisé de  $4*4*16\text{ cm}^3$ , donc, trois échantillons pour chaque rapport E/C. Les rapports E/C des pâtes de ciment fabriqués sont : 0.30 (P030), 0.35 (P035), 0.40 (P040), 0.45 (P045) et 0.50 (P050). Les formulations des pâtes sont détaillées dans le Tableau III.4.

| Matériaux | P030 | P035 | P040 | P045 | P050 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| CEM I (g) | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 | 1500 |
| Eau (g)   | 450  | 525  | 600  | 675  | 750  |

TABLE III.4 – Composition des pâtes de ciment

Les pâtes de ciment sont préparées au laboratoire en utilisant un malaxeur dont le volume du bol est de 5 litres. La fabrication des pâtes est faite selon la séquence suivante :

1. Introduire le ciment et de l'eau dans le bol et mettre en marche immédiatement le malaxeur à petite vitesse pendant 1 minute.
2. Arrêter le malaxeur pendant 90 secondes. Enlever avec une raclette toute la pâte de ciment adhérant aux parois et la placer au milieu du bol.
3. Remettre en marche le malaxeur à grande vitesse pendant 1 minute.

Après le dernier malaxage, nous coulons immédiatement les pâtes dans les moules métalliques. Nous utilisons comme agent démoulant de l'huile de démoulage minérale "DÉMOULAGE 80" (FBC lubrifiants). Les pâtes sont coulées en une seule couche et compactées par vibration avec l'utilisation d'une table à choc. Le temps de vibration pour chaque mélange est estimé expérimentalement selon leur fluidité (Tableau III.5). Plus la pâte de ciment est fluide et moins un temps de vibration important est nécessaire pour obtenir une pâte uniforme et compacte. Ensuite, les échantillons sont couverts avec une plaque en verre pour éviter l'évaporation. Après 24 heures, les pâtes sont démoulées et placées dans une chambre climatisée à température (T) et à l'humidité relative (HR) contrôlée (T= 26 °C et HR=51).

## b. Mesure de la clarté (L\*) du ciment

D'après la littérature, la couleur du ciment détermine la couleur finale de la surface des pâtes durcies. Le ciment en poudre a sa propre clarté et dépend du type de ciment. Dans cette partie, nous allons déterminer la clarté de 3 types de ciment que nous utilisons au laboratoire de l'IRC. Les ciments de type CEM I ou ciment Portland, qui contient au moins 95% de clinker, le CEM II qui contiennent au moins 65% de clinker et le CEM III qui contient entre 20 et 64% de clinker ([Infociments, 2016](#))



FIGURE III.5 – Variation de la couleur selon le type de ciment : CEM I, CEM II et CEM III

D'après la Figure III.5, à l'oeil nu, nous voyons que le ciment de type CEM I est plus sombre par rapport au CEM II et CEM III. Avec le spectrocolorimètre, nous pouvons confirmer ses observations. Ainsi, la clarté du CEM I est de 66.9, du CEM II est 67.8 et du CEM III est 79. Selon le fabricant de notre CEM I (Equiom), l'indice de clarté est de 65.6, donc nous avons une légère différence avec notre mesure (valeur). A partir de ces résultats, nous avons pu voir la variation de la clarté selon le type du ciment. Nous savons qu'un CEM I a plus de clinker dans sa composition que les autres types de ciment. Donc, ces mesures confirment le fait que la quantité de clinker dans le ciment détermine la teinte plus ou moins sombre du ciment.

## c. Variation de la teinte des pâtes de ciment durcit

La variation de la couleur des échantillons des pâtes de ciment durcies a été comparée premièrement à l'oeil nu pendant 28 jours. Ainsi nous avons pu observer ce qui suit :

1. Le premier jour du démoulage, nous observons que les parois de tous les échantillons des pâtes de ciment durcies sont encore humides. Particulièrement les pâtes P050 semblent plus humide et plus sombre par rapport aux autres.
2. Après démoulage, l'humidité de la surface des pâtes de ciment disparaît rapidement. L'évaporation peut s'opérer sur 1 à 2 jours.
3. Après 28 jours (Figure III.6), la pâte P030 est sombre avec de petites zones claires. La pâte P035 semble moins sombre que la précédente, avec quelques zones claires. La pâte P040 ressemble beaucoup à la précédente. La pâte P045 semble claire avec quelques zones sombres. Enfin la pâte P050 est nettement claire avec de petites zones sombres.

| Matériaux | P030 | P035 | P040 | P045 | P050 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| Temps (s) | 30   | 20   | 15   | 10   | 5    |

TABLE III.5 – Temps de vibration pour les pâtes de ciment selon leur rapport E/C

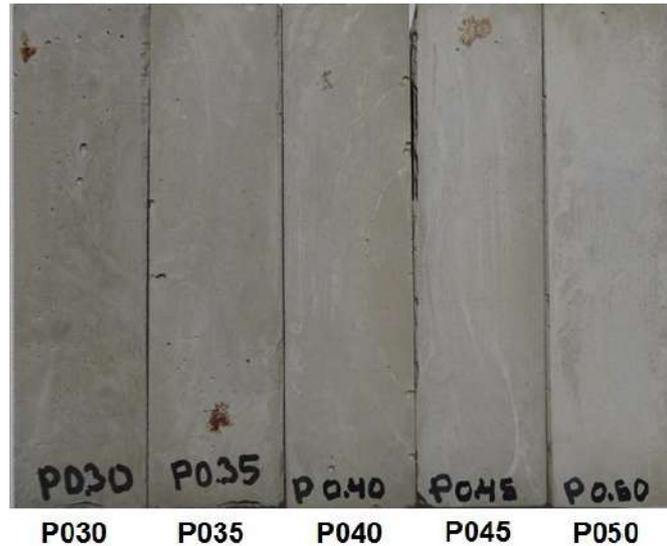


FIGURE III.6 – Variation de la teinte de la surface coffrée des pâtes de ciment avec différents rapport E/C après 28 jours

4. Nous constatons que la teinte de la pâte P050 est la plus claire et la pâte P030 est la plus sombre. Donc, la clarté augmente avec l'augmentation du rapport E/C. C'est-à-dire, les rapport E/C plus élevés sont plus claires.
5. La variation de pores dans les surfaces des pâtes évolue également avec l'augmentation du rapport E/C (Figure III.7). La pâte P030 a de gros pores d'environ 4 mm. La pâte P035 a des pores plus petits que la précédent avec des pores d'environ 1 mm. La pâte P040 présente de petits pores et moins nombreux que la précédente, avec des pores de plus ou moins 1 mm. La pâte P045 a des pores très petits et moins nombreux. Finalement la pâte P050 semble lisse et ne semble pas avoir de pores bien visibles.
6. Sur les surfaces des pâtes, nous pouvons observer des lignes blanches généralement proches des pores de surface. Ces lignes blanches pourraient être le produit du phénomène connu sous le nom de sécrétion de chaux en surface (TFB, 1966). Mais ce phénomène est rare, donc il ne pouvait pas beaucoup affecter sur la valeur finale mesurée de la clarté de surface.

Pour confirmer nos résultats visuels sur la variation de la teinte, nous utilisons le spectrocolorimètre. Nous mesurons les clartés des surfaces en fonction du temps et du rapport E/C (Figure III.8). Avec le spectrocolorimètre, nous prenons 6 mesures de la surface coffrée pour chaque rapport E/C. Les endroits des surfaces mesurées ont été choisis aléatoirement.

A partir de la Figure III.8 qui montre la variation de la clarté en fonction du temps et du rapport E/C, nous observons ce qui suit :

1. Deux zones sur la variation de la clarté des pâtes : Une première zone (I) où la clarté augmente très rapidement, et peut durer sur 4 jours maximum. Cela peut être dû au séchage (évaporation) de l'eau présente dans les surfaces des pâtes après démoulage. Une deuxième zone (II), pour laquelle, après 4 jours, la clarté va continuer à augmenter très légèrement pour finalement rester quasi constante.
2. Le jour du démoulage, les clartés des pâtes de ciment sont très basses. Les clartés varient entre 62 et 66, avec des clartés similaires pour les pâtes P030, P035 et P050.

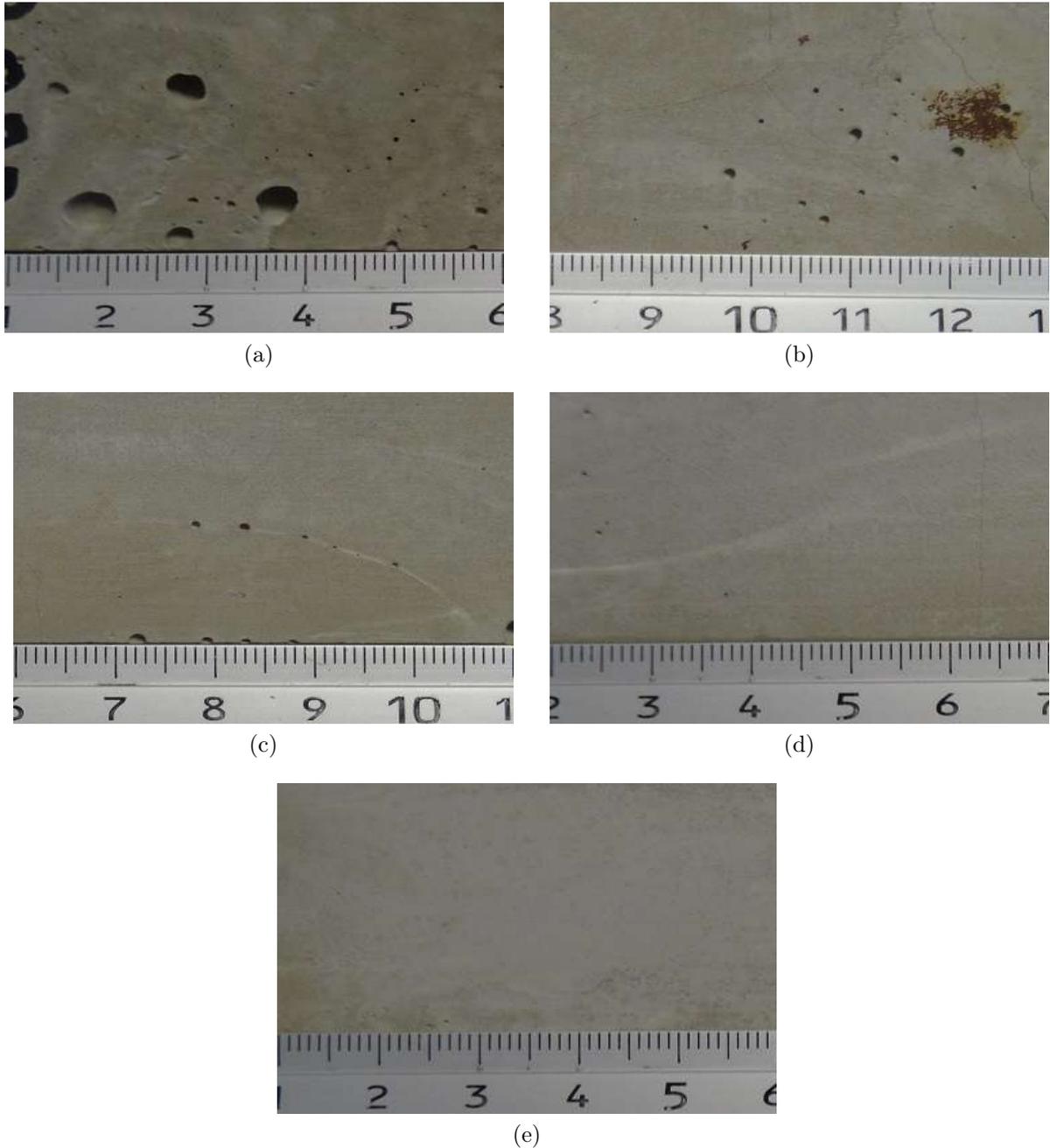


FIGURE III.7 – Variation de la taille de pores dans les pâtes selon le rapport E/C : (a) P030, (b) P035, (c) P040, (d) P045 et (e) P050

3. Les pâtes P050 au premier jour, sont très sombres. Après 4 jours, elles deviennent plus claires que les autres. L'humidité pourrait être la cause d'une clarté très basse les premiers jours. Selon ([Lekner and Dorf, 1988](#)), les matériaux sont plus foncés lorsqu'ils sont mouillés.
4. Après 8 jours, les clartés de pâtes P045 et P050 sont presque similaires, avec une différence de l'ordre de  $\Delta L^* = 1.41$ .
5. Après 28 jours, nous constatons que les pâtes de ciment P050 sont plus claires que les autres, et que les pâtes P030 sont les plus sombres. Donc, la clarté augmente avec l'augmentation du rapport E/C. Plus les rapport E/C sont élevés, plus claires sont les surfaces des pâtes de ciment.

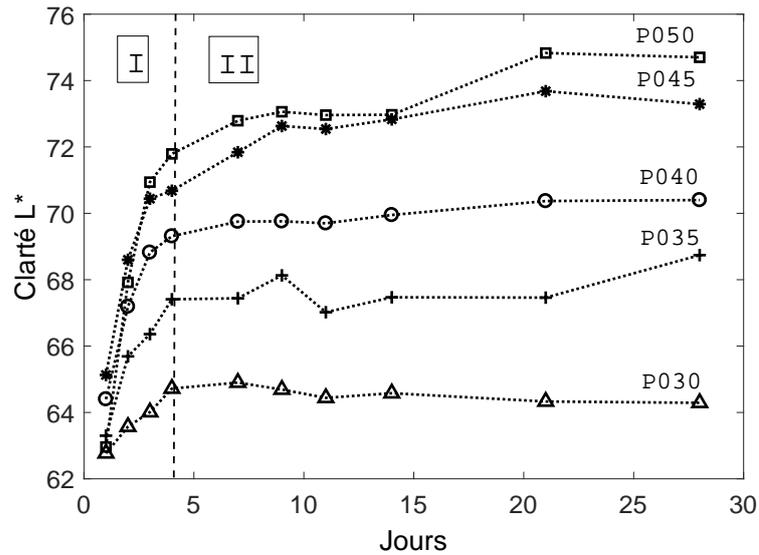


FIGURE III.8 – Variation de la clarté moyenne (6 mesures) en fonction du rapport E/C et du temps d'hydratation

A partir des nos mesures des clartés après 28 jours, nous traçons la courbe de variation de la clarté en fonction du rapport E/C. D'après la Figure III.9, nous constatons l'augmentation de la clarté avec l'augmentation du rapport E/C. La clarté d'une surface du béton peut varier selon les conditions de stockage (Strehlein and P., 2008). Ainsi, un matériau cimentaire stocké dans un endroit humide et à basse température, peut générer une surface sombre, contrairement à un matériau stocké dans un endroit sec et à haute température. Dans notre cas, les conditions de stockage pour tous nos échantillons sont les mêmes (préparés en laboratoire climatisé à température moyenne de 25 °C et humidité relative de 50%). Nos résultats montrent, dans un premier temps, l'augmentation de la clarté due au séchage des surfaces de la pâte de ciment, et dans un second temps, lorsque le séchage est terminé, une stabilité ou très légère augmentation de la clarté.

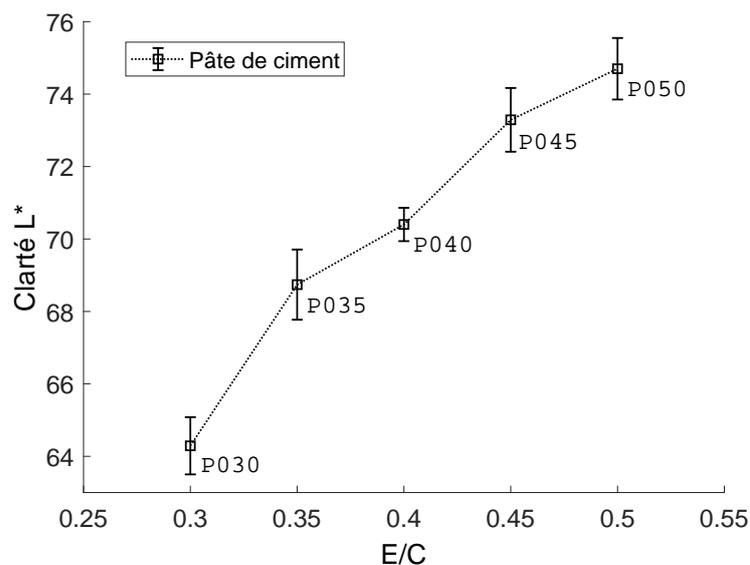


FIGURE III.9 – Variation de la clarté moyenne en fonction du rapport E/C après 28 jours

#### d. Rugosité

Avec le microscope numérique "Keyence" du LMT Cachan, nous mesurons l'état des surfaces coffrés des pâtes de ciment à l'échelle microscopique. Nous utilisons le coefficient de surface développée ( $R_s$ ) pour décrire la rugosité (Équation III.4). L'agrandissement de la mesure est de 200x avec une surface géométrique de mesure de  $1.6048 \text{ mm}^2$ . Le microscope numérique permet d'obtenir des images 2D et 3D. Nous prenons 7 mesures de la surface coffrée pour chaque rapport E/C. Les endroits des surfaces mesurées avec le microscope ont été choisis aléatoirement. La plupart des surfaces mesurées ne présentaient pas de porosités apparentes de surface visibles à l'oeil nu. Premièrement, nous faisons une observation à partir des images 2D : la Figure III.10, nous montre des images représentatives pour chaque rapport E/C parmi les 7 images 2D obtenus.

D'après les images 2D obtenues et présentées par la Figure III.10, nous observons la variation de la surface (texture) des pâtes de ciment à l'échelle microscopique. À première vue, nous voyons un aplatissement de la surface au fur et à mesure de l'augmentation du rapport E/C. Dans les figures, les zones sombres représentent la profondeur maximale des vallées et les zones claires la hauteur maximale des profils. Pour l'échantillon P030, nous voyons une surface bien hétérogène avec une surface bien texturée. Pour l'échantillon P035, la texture de la surface semble diminuer avec plus de parties claires. La pâte P040 contient moins de points noirs et plus de parties claires, les parties claires étant plus étendues que les parties sombres. Le même constat peut être fait pour la pâte P045. Enfin la pâte P050, présente une coloration presque uniforme, nette et claire. Si nous choisissons les deux extrêmes pour faire une comparaison visuelle photographique (pâtes P030 et P050), nous observons clairement une différence de texture, avec une pâte P030 très texturée, composée de zones claires et sombres bien réparties par rapport à la pâte P050 qui est très plate avec une couleur quasi uniforme (moins texturée). Pour confirmer nos estimations visuelles, à partir de ces mêmes images 2D nous mesurons la rugosité en 3D (Figure III.11).

La Figure III.11, illustre les résultats 3D de nos mesures de rugosité : La couleur rouge représente la partie la plus élevée du profil de rugosité et la couleur bleue représente la partie la plus basse ou la profondeur. Pour la pâte P030, nous voyons une surface avec des zones hautes et des zones basses dans la partie centrale, avec une hauteur de crête maximale de  $51.28 \mu\text{m}$ . Pour la pâte P035, le nombre de pics diminue et la partie plate est plus grande. Dans les pâtes P040 les pics disparaissent petit à petit, et la partie plate contient beaucoup de trous ou de petites zones sombres. Ces petites zones sombres représentent la partie la plus basse de l'échantillon. Dans les pâtes P045 les pics ont presque disparu. Dans la zone plate, le nombre de trous ou de zones sombres diminue. Enfin les pâtes P050, se composent de pics avec une hauteur maximale de  $31.58 \mu\text{m}$ .

A partir de nos résultats, nous observons : d'une part que, les pâtes P030 ont beaucoup de pics élevés avec des zones basses bien marquées, d'autre part que, la pâte P050 ne présente pas beaucoup de pics et surtout moins élevé, avec une zone beaucoup plus plate par rapport à la pâte P030. La texture des surfaces diminue bel et bien avec l'augmentation du rapport E/C. A partir de ces observations visuelles en 2D et 3D, nous comparons les valeurs numériques mesurées. Ces résultats sont détaillés dans le Tableau III.6 et dessinés dans la Figure III.12. Les termes utilisés sont :  $S_m$  étant la surface mesurée,  $S_g$  étant la surface géométrique et  $R_s$  étant la surface développée.

Finalement, à partir de nos observations visuelles sur les images 2D, les résultats de mesures en 3D et nos mesures dessinées dans la Figure III.12, nous confirmons la variation de

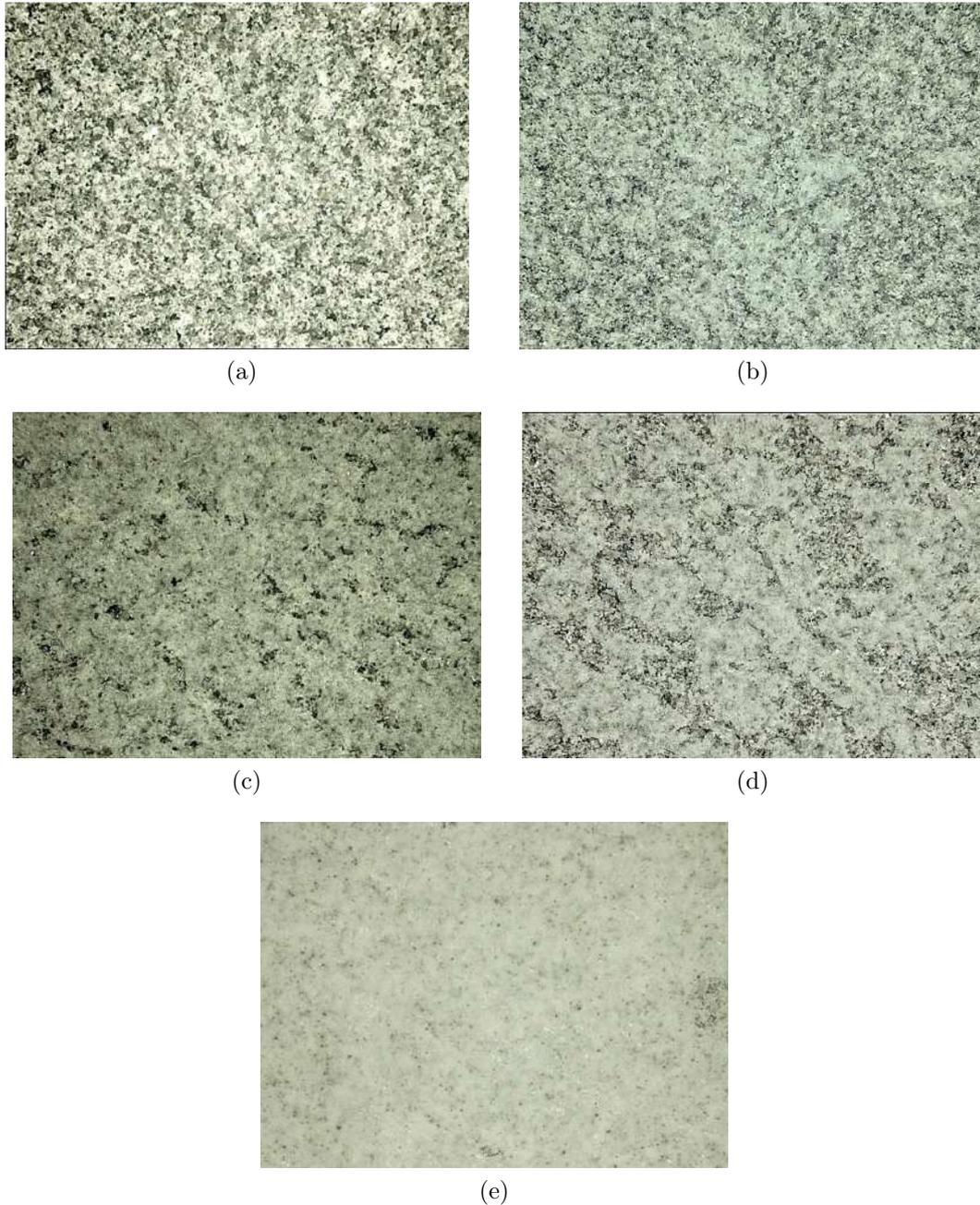


FIGURE III.10 – Images 2D des surfaces des pâtes avec un agrandissement de 500x (taille :  $1462 * 1097 \mu m^2$ ) : (a) P030, (b) P035, (c) P040, (d) P045 et (e) P050

l'état des surfaces des pâtes de ciment en fonction du rapport E/C. Nous voyons que l'augmentation du rapport E/C de formulation dans les pâtes de ciment entraîne la diminution de la surface développée. L'écart-type dans les pâtes P030 est très important par rapport aux autres, qui peut être dû à la présence de pores dans sa surface. La porosité influence à priori également la teinte finale des pâtes de ciment.

A partir des données obtenues précédemment, nous pouvons valider l'influence de la rugosité sur la clarté de surface des pâtes de ciment. Nous concluons que l'augmentation de la rugosité (surfaces texturée) entraîne la diminution de la clarté, c'est-à-dire, que lorsque la rugosité est importante, alors la surface devient plus sombre.

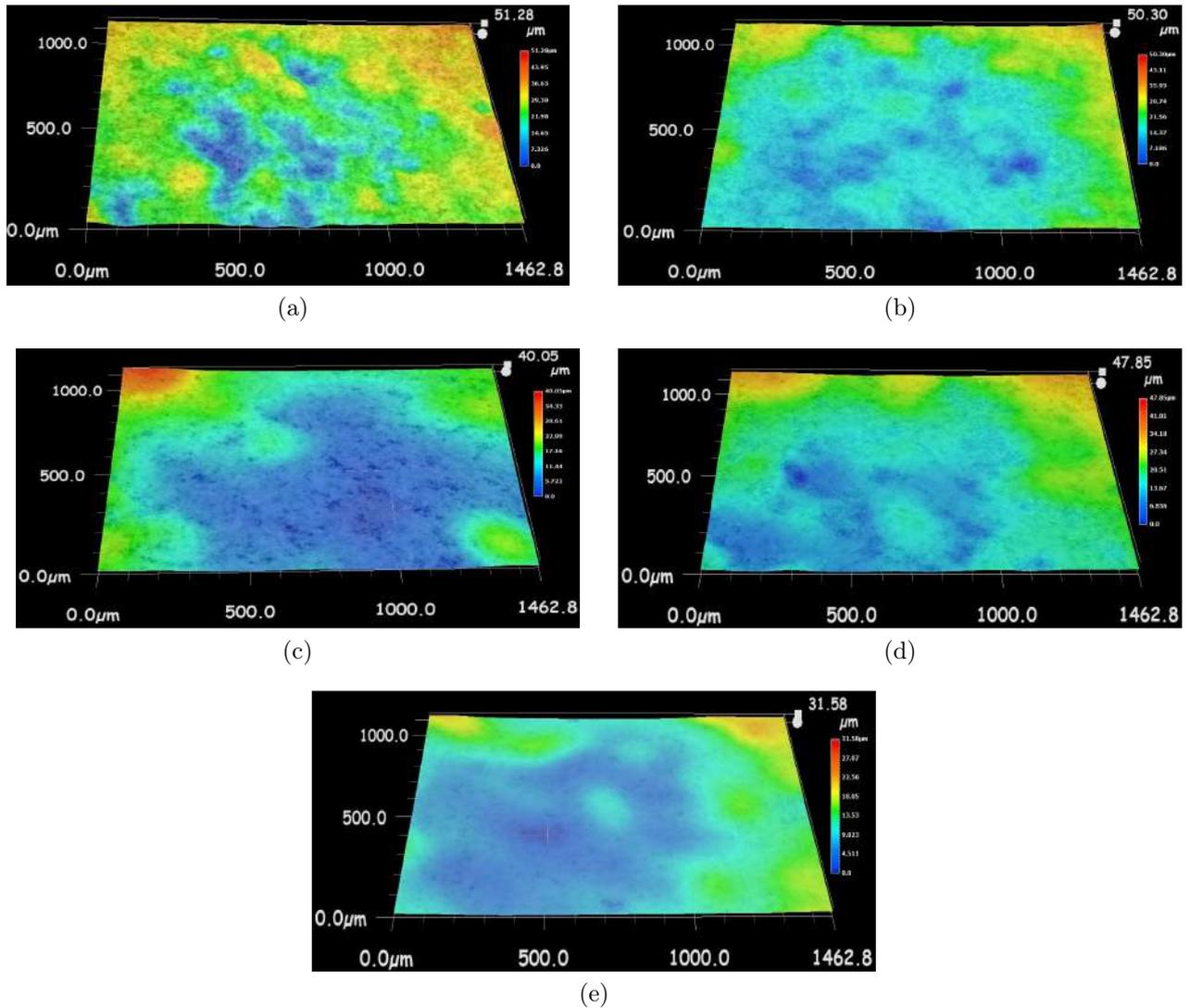


FIGURE III.11 – Images 3D des surfaces des pâtes avec un agrandissement de 500x (taille :  $1462 * 1097 \mu m^2$ ) : (a) P030, (b) P035, (c) P040, (d) P045 et (e) P050

## III.2.2 Mortier normalisé

### a. Matériaux et composition

Dans la continuité de nos essais de détermination de la variation de la clarté ( $L^*$ ) et de la rugosité ( $R_s$ ) en fonction du rapport E/C de la formulation, la même démarche peut être suivie sur les mortiers fabriqués à partir du CEM I et du sable normalisé dans un moule rectangulaire métallique normalisé de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Comme précédemment, 15 échantillons sont réalisés, trois pour chaque rapport E/C. (0.40 (M040), 0.45 (M045), 0.50 (M050), 0.55 (M055) et 0.60 (M060)). La formulation des mortiers est détaillée dans le Tableau III.7.

Les mortiers sont préparés en laboratoire en utilisant un malaxeur dont le volume de bol est de 5 litres. La fabrication des mortiers est faite selon la séquence suivante [NF EN 196-1] :

1. Introduire le ciment et de l'eau dans le bol. Mettre en marche le malaxeur à petite vitesse pendant 30 secondes.
2. Incorporer le sable régulièrement et poursuivre à vitesse lente pendant 30 secondes.

| Matériaux | $S_m$ ( $mm^2$ ) | $S_g$ ( $mm^2$ ) | $R_s$ (%) |
|-----------|------------------|------------------|-----------|
| P030      | 1.6152           | 1.6048           | 100.644   |
| P035      | 1.6099           | 1.6048           | 100.320   |
| P040      | 1.6088           | 1.6048           | 100.247   |
| P045      | 1.6068           | 1.6048           | 100.127   |
| P050      | 1.6067           | 1.6048           | 100.114   |

TABLE III.6 – Valeur moyenne des surfaces développées ( $R_s$ ) des pâtes de ciment.

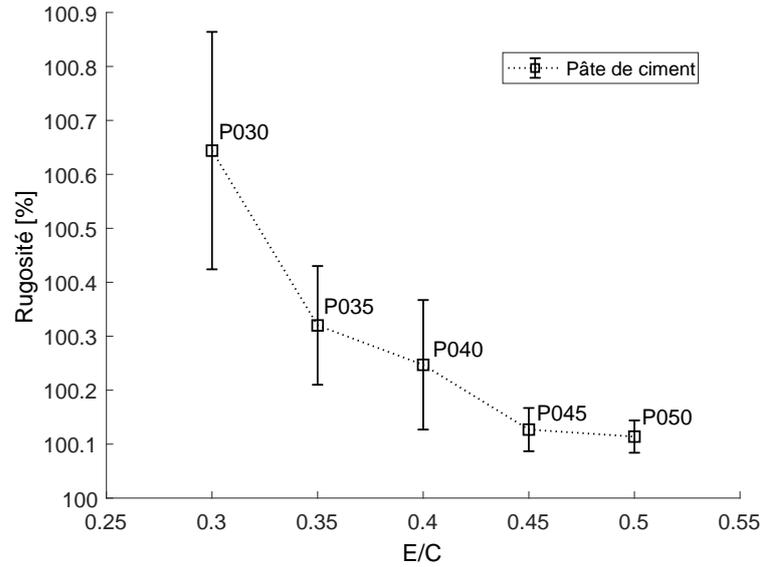


FIGURE III.12 – Variation de la rugosité moyenne en fonction du rapport E/C de pâtes de ciment. Où  $S_m$  est la surface mesurée,  $S_g$  est la surface géométrique et  $R_s$  est la surface développée.

| Matériaux | M040 | M045  | M050 | M055  | M060 |
|-----------|------|-------|------|-------|------|
| CEM I (g) | 450  | 450   | 450  | 450   | 450  |
| Sable (g) | 1350 | 1350  | 1350 | 1350  | 1350 |
| Eau (g)   | 180  | 202.5 | 225  | 247.5 | 270  |

TABLE III.7 – Composition des mortiers

3. Ensuite mettre en marche à grande vitesse pendant 30 secondes.
4. Arrêter le malaxeur pendant 90 secondes et racler la paroi du malaxeur et le fond de la cuve.
5. Remettre le malaxeur en marche à vitesse rapide pendant 60 secondes.

Après le dernier malaxage, les mortiers sont immédiatement coulés dans les moules métalliques. L'agent démoulant est le même que celui utilisé pour les pâtes, l'huile de démoulage minérale "DÉMOULAGE 80" (FBC lubrifiants). Les mortiers sont coulés en deux couches et compactés par vibration avec l'utilisation d'une table au choc. Le temps de vibration pour chaque mortier est estimé expérimentalement selon leur fluidité (Tableau III.8). Plus l'étalement du mortier est grande et moins un temps de vibration important est nécessaire pour obtenir une surface de mortier uniforme et compacte. Les échantillons sont couverts avec une plaque en verre pour éviter l'évaporation. Après 24 heures, les mortiers sont ensuite démoulés

et placés dans une chambre climatique à température (T) et humidité relative (HR) contrôlée (T=  $20 \pm 2$  °C et HR=  $45 \pm 5$ ).

| Matériaux | M040 | M045 | M050 | M055 | M060 |
|-----------|------|------|------|------|------|
| Temps (s) | 100  | 70   | 60   | 40   | 30   |

TABLE III.8 – Temps de vibration pour les échantillons des mortiers selon leur rapport E/C

## b. Variation de la teinte des mortiers durcis

La variation de la couleur des échantillons des mortiers durcis est analysé premièrement à l’œil nu. Ainsi nous observons ce qui suit :

1. Le premier jour du démoulage, les parois de tous les échantillons des mortiers durcis sont encore humides, surtout pour les mortiers M060 qui semblent plus humide et plus sombres que les autres échantillons.
2. Après le démoulage, l’humidité de la surface des mortiers disparaît rapidement, sur une durée maximum de 2 jours.
3. Après 28 jours (Figure III.13), le mortier M040 apparaît sombre avec des taches sombres qui représentent des pores de surface. Le mortier M045 est moins foncé que le précédent avec moins de pores de surface. Le mortier M050 a la même couleur que le précédent avec encore moins de pores de surfaces. Le mortier M055 semble un peu plus clair et avec la même quantité de pores que le précédent. Enfin, le mortier M060 semble beaucoup plus clair que les autres avec une surface plus lisse et sans présence des pores.
4. Nous constatons que la clarté du mortier M060 est la plus claire et le mortier M040 est la plus sombre. Donc la clarté augmente avec l’augmentation du rapport E/C. C’est-à-dire, plus les rapports E/C sont élevés, plus les surfaces des mortiers sont claires.
5. La qualité et la présence des pores sur les surfaces des mortiers varient avec l’augmentation du rapport E/C. La surface du mortier M040 contient de nombreux pores d’environ 4 mm de diamètre. Le mortier M045 contient des pores d’environ 3 mm. Les mortiers P050 et P055 contiennent des pores de plus ou moins 2 mm. Et enfin, le mortier P060 contient de petits pores de moins de 1 mm. Les résultats présentés sur la Figure III.13, nous permettent de déduire que la quantité de pores et leur taille diminuent avec l’augmentation de la quantité d’eau utilisée pour la fabrication du mortier.

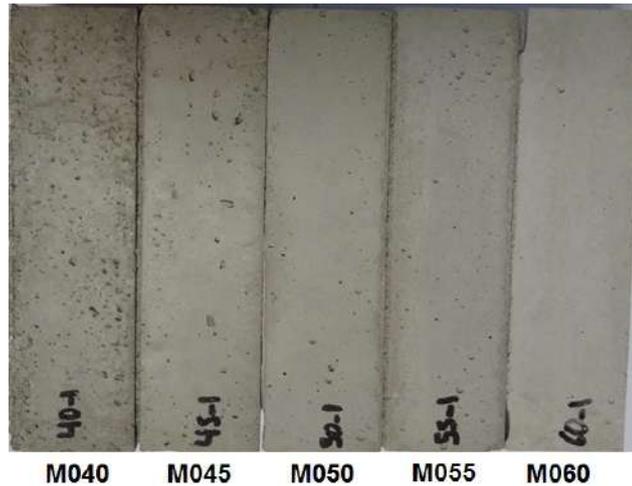


FIGURE III.13 – Variation de la teinte des mortiers selon leur rapport E/C après 28 jours

Pour confirmer nos résultats visuels de la teinte des surfaces du mortier, utilisons le spectrocolorimètre. Nous mesurons les clartés de surfaces en fonction du temps et du rapport E/C à 6 reprises sur la surface coffrée pour chaque rapport E/C. Les endroits des surfaces mesurés sont choisis aléatoirement.

D'après la Figure III.15, par rapport à la variation de la clarté en fonction du temps et du rapport E/C, nous observons ce qui suit :

1. Le jour de démoulage, les clartés de tous les échantillons sont très basses.
2. Globalement deux zones de variation de clarté des mortiers sont identifiées : Une première zone (I) où la clarté augmente très rapidement sur 2 jours maximum. Cela peut être dû au séchage (évaporation) de l'eau présente dans les surfaces des mortiers après démoulage. Une deuxième zone (II) pour laquelle, la clarté va continuer à augmenter très légèrement après 2 jours pour finalement rester quasi constante. Par exemple pour les mortiers M060 au premier jour, elles sont très sombre par rapport aux autres, mais après 2 jours, elles deviennent plus claires.
3. Les clartés de mortiers M050 et M055 sont très similaires, avec une différence de l'ordre de  $\Delta L^* = 0.17$ . Selon la littérature peut être considéré comme des teintes différentes lorsque la variation est supérieure à 2.
4. Après 28 jours, nous constatons que les mortiers M060 sont plus clairs que les autres, et que les mortiers M040 sont les plus sombres.

A partir des mesures de clartés effectuées après 28 jours, nous traçons la variation de la clarté en fonction du rapport E/C (Figure III.16). Nous confirmons que l'augmentation de la clarté est lié à l'augmentation du rapport E/C. Concernant la dispersion des résultats, l'écart-type du mortier M040 est très grand par rapport aux autres. Cela peut être dû à la présence de pores de surface très nombreux dans les mortiers. Avec l'augmentation du rapport E/C le mortier devient moins poreux et plutôt lisse. Donc ses écarts-types diminuent aussi.

### c. Rugosité

Avec le microscope numérique utilisé pour les pâtes de ciment, nous mesurons l'état de surface des mortiers. Nous utilisons le coefficient de surface développée ( $R_s$ ) pour décrire

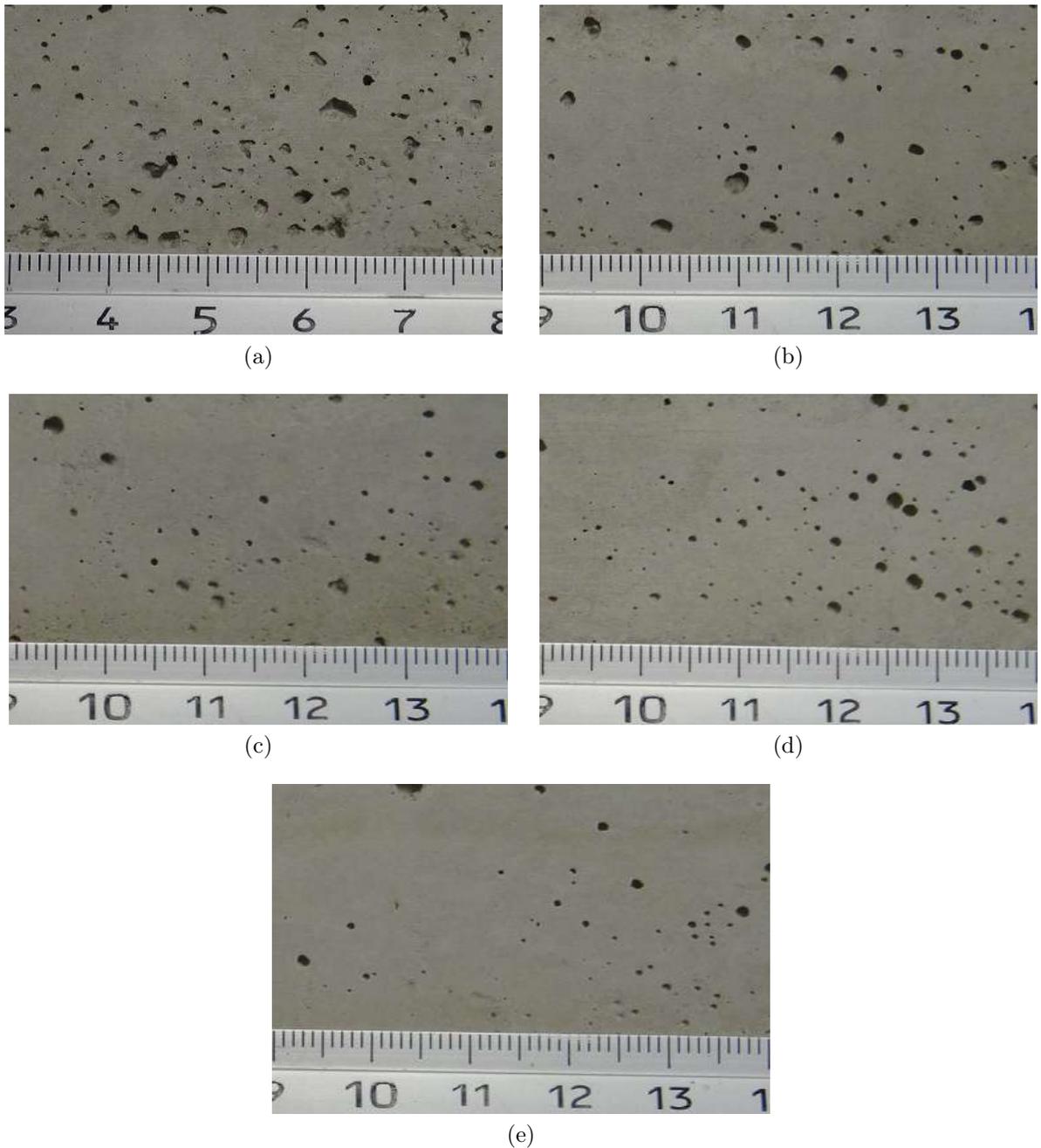


FIGURE III.14 – Variation de la taille de pores dans les mortiers selon le rapport E/C : (a) M040, (b) M045, (c) M050, (d) M055 et (e) M060

la rugosité (Équation III.4). L'agrandissement de la mesure est de 200x avec une surface géométrique de mesure de  $1.6048 \text{ mm}^2$ . Le microscope numérique nous permet d'obtenir des images 2D et 3D de l'état de surface à l'échelle microscopique de mortiers. Premièrement, nous faisons une observation à partir d'images 2D, réalisés sur 7 mesures de surface coffrée pour chaque rapport E/C. Les endroits des surfaces mesurées avec le microscope sont choisis aléatoirement. La Figure III.17 présente une image représentative pour chaque rapport E/C parmi les 7 images 2D obtenues.

D'après les images 2D obtenues, nous observons la variation de la surface (texture) des mortiers à l'échelle microscopique. Dans les images, nous voyons une surface rugueuse, avec des zones sombres qui représentent la profondeur maximale et les zones claires qui repré-



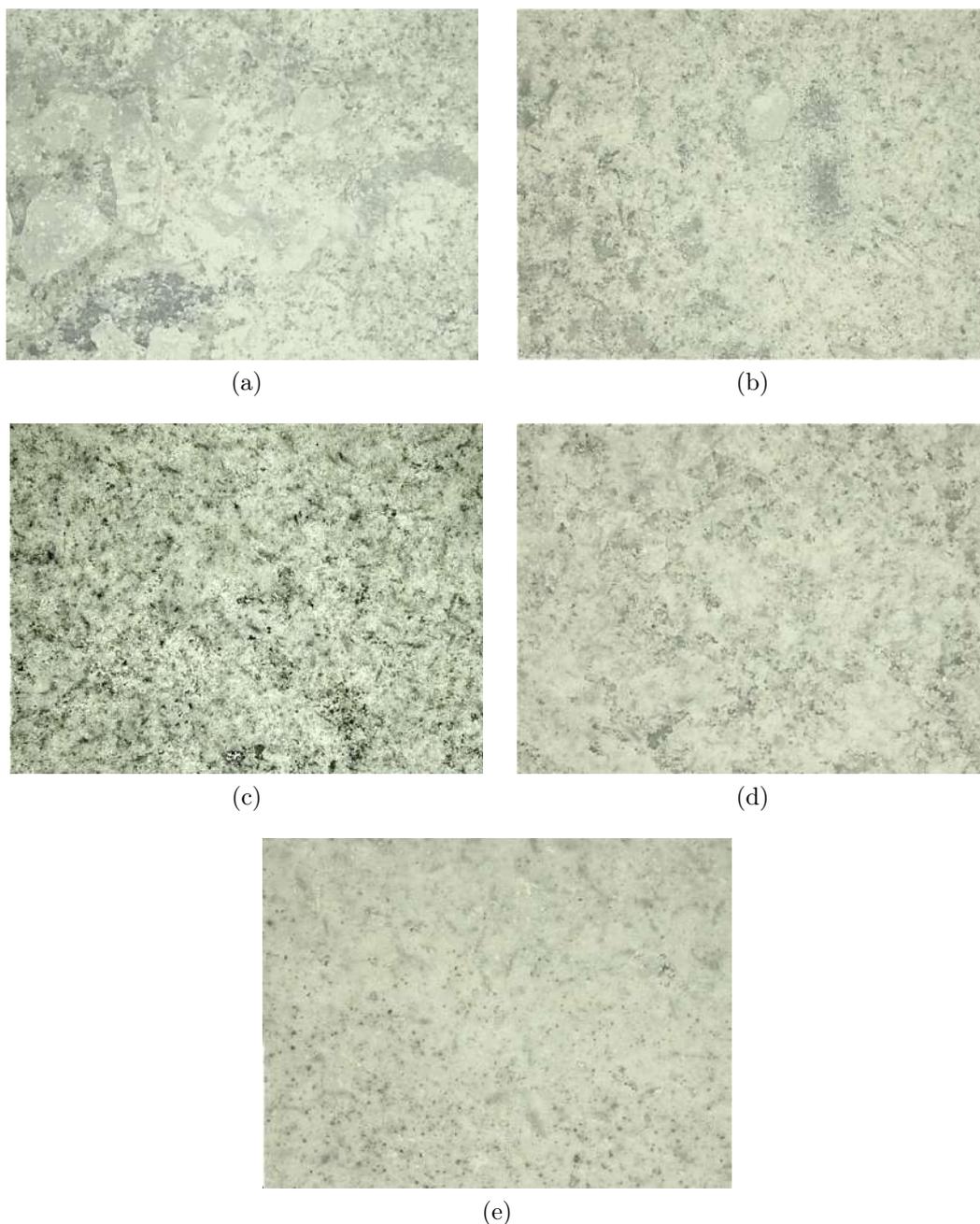


FIGURE III.17 – Variation des surfaces des mortiers selon le rapport E/C avec un agrandissement de 200x : (a) M040, (b) M045, (c) M050 (d) M055 et (e) M060

ou la profondeur. Dans le mortier M040 nous pouvons clairement voir la présence de zones profondes en particulier sur le côté gauche. De même, nous pouvons voir que la hauteur maximale du profil est de  $152 \mu m$ . Le mortier M045 présente des zones moins profondes par rapport au mortier précédent, avec une hauteur maximale de  $138 \mu m$ . Les mortiers M050 et M055, semblent similaires, avec des zones plates très étendues et avec une hauteur maximale de profil de plus ou moins  $54 \mu m$ . Dans le mortier M060 la surface est plate, avec une hauteur de profil maximum d'environ  $27 \mu m$ . Ainsi, à partir de nos observations, nous déduisons que l'augmentation du rapport E/C génère la réduction de la rugosité des surfaces du mortier. Pour confirmer cette affirmation, nous comparons nos résultats visuels (2D et 3D) aux résultats numériques obtenus au microscope numérique. Nous montrons ces résultats

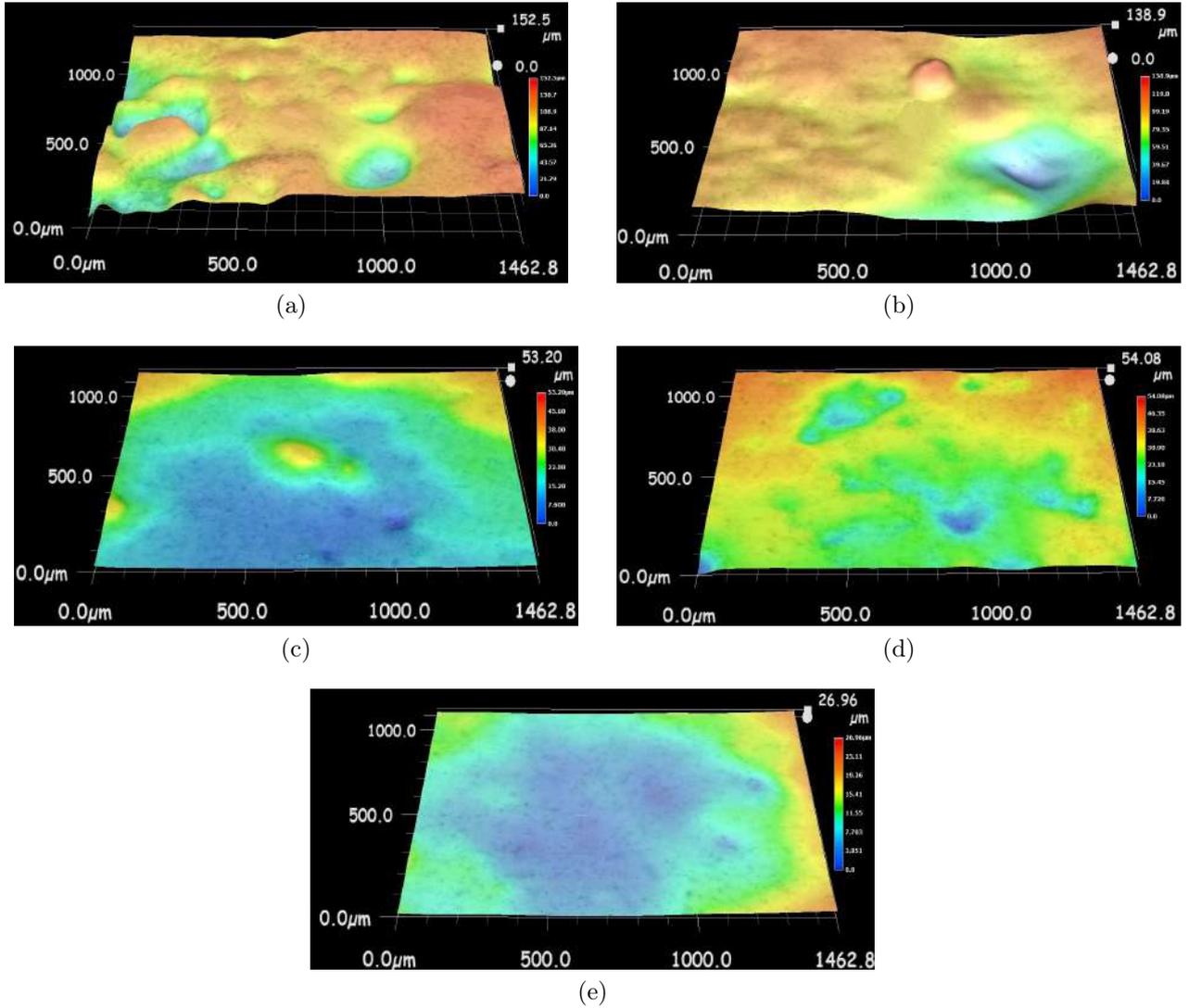


FIGURE III.18 – Image 3D de l'état de surface des mortiers selon le rapport E/C : (a) M040, (b) M045, (c) M050 (d) M055 et (e) M060

dans le Tableau III.9 et nous les traçons dans la Figure III.19.

Où  $S_m$  est la surface mesurée,  $S_g$  est la surface géométrique et  $R_s$  est la surface développée.

Pour conclure, à partir de nos observations visuelles sur les images 2D et les résultats des mesures 3D(Figure III.19), nous confirmons la variation de l'état des surfaces des mortiers en fonction du rapport E/C. L'augmentation du rapport E/C de formulation dans les mortiers entraîne la diminution de la surface développée. L'écart-type dans les mortiers M040 est très importante par rapport aux autres, ce qui peut être dû à la présence des pores dans sa surface. Les nombres et les tailles des pores de surface peuvent alors influencer à priori la teinte finale des mortiers.

A partir des données obtenues précédemment, nous confirmons l'influence de la rugosité sur la clarté de surface des mortiers. Ainsi, nous pouvons conclure que l'augmentation de la rugosité (surfaces texturée) entraîne la diminution de la clarté, c'est-à-dire, que si la rugosité est importante, la surface devient plus sombre. Et que si la surface est plate, alors la teinte est claire.

| Matériaux | $S_m$ ( $mm^2$ ) | $S_g$ ( $mm^2$ ) | $R_s$ (%) |
|-----------|------------------|------------------|-----------|
| M040      | 1.6245           | 1.6048           | 101.224   |
| M045      | 1.6105           | 1.6048           | 100.356   |
| M050      | 1.6067           | 1.6048           | 100.118   |
| M055      | 1.6082           | 1.6048           | 100.210   |
| M060      | 1.6064           | 1.6048           | 100.101   |

TABLE III.9 – Surfaces développées des mortiers ( $S_r$ ) en fonction du rapport E/C. Où  $S_m$  est la surface mesurée,  $S_g$  est la surface géométrique et  $R_s$  est la surface développée.

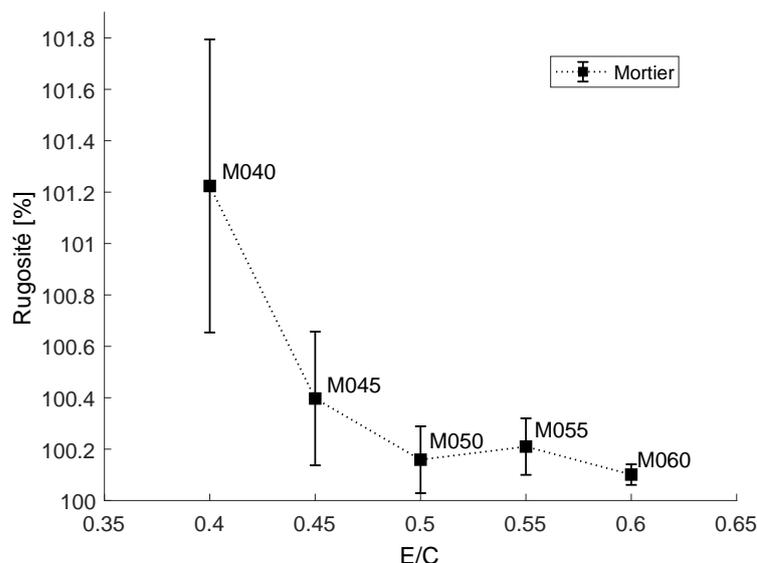


FIGURE III.19 – Variation de la rugosité moyenne en fonction du rapport E/C de mortiers

### III.2.3 Comparaison des résultats entre les pâtes de ciment et les mortiers

Dans cette partie, nous comparons la variation de la clarté des pâtes et des mortiers en fonction du rapport E/C. Ce qui nous permet de déterminer l'influence du sable sur la clarté finale de la pâte de ciment. À première vue, nous voyons que les mortiers sont un peu plus sombres que les pâtes. D'autre part, les mortiers ont un grand nombre de pores des surface et des tailles plus importante que les pâtes. Ces différences peuvent être facilement identifiées, en superposant la Figure III.9 et la Figure III.16 dans une nouvelle figure (Figure III.20).

Sur la Figure III.20, dont les valeurs sont prises après 28 jours, la variation de la clarté des mortiers peut être comparée à celle des pâtes. Nous pouvons observer que, les mortiers avec le même rapport E/C sont plus foncés (faible clarté mais avec une différence des clartés supérieurs à 2 points) que les pâtes. Les résultats des pâtes P040 présentent des valeurs similaires à ceux des mortiers M045. Il en est de même, entre les pâtes P050 et les mortiers M060. Comment pouvons-nous expliquer cela ? D'après la littérature, l'apparence de la surface des matériaux cimentaires est un phénomène de surface qui dépend généralement des composants les plus fins du béton tels que le ciment. Ce dernier forme une peau de pâte de ciment de quelques micromètres en surface. Dans ce cas, l'aspect de la surface du mortier serait représenté par la couche de pâte de ciment présente dans le mortier. Dans notre exemple, on pourrait considérer que le rapport E/C de la pâte de ciment P040 (0,40) est similaire au rapport E/C de la pâte de ciment du mortier M045. il y a alors une différence de

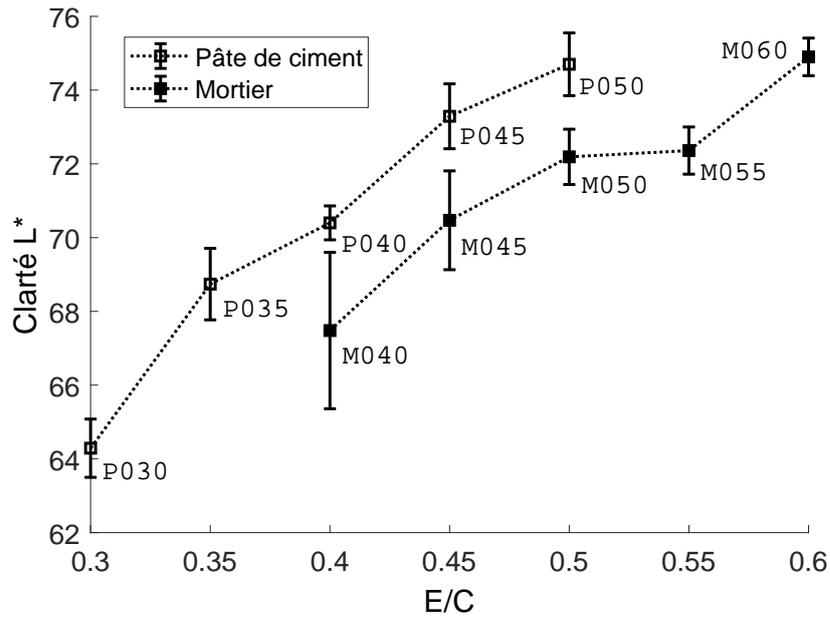


FIGURE III.20 – Variation de la clarté moyenne des pâtes et des mortiers en fonction du rapport E/C

0,05% d'eau. Cette différence peut s'expliquer par une absorption de l'eau par les grains de sable. Cela entraînerait une diminution du rapport E/C de la pâte de ciment présente dans le mortier, et donc, une diminution de la clarté. Finalement, nous voyons également que la tendance des deux courbes (pâtes et mortiers) est la même. Cela signifie que l'augmentation du rapport E/C entraîne toujours l'augmentation de la clarté dans les matériaux cimentaires. De la même manière, nous faisons une comparaison de la variation de la rugosité par rapport au rapport E/C (Figure III.21).

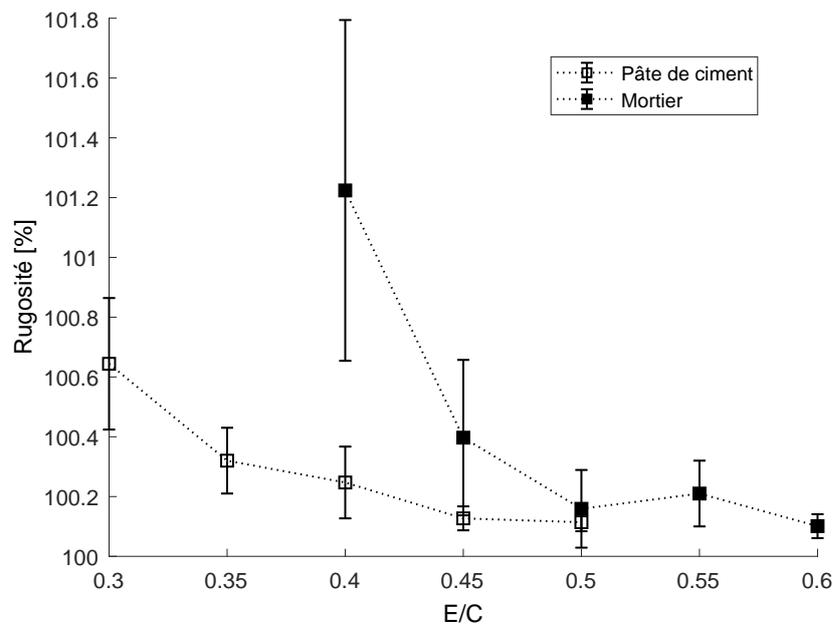


FIGURE III.21 – Variation de la rugosité moyenne des pâtes et des mortiers en fonction du rapport E/C

La comparaison de la variation de la rugosité entre les pâtes et les mortiers, peut se faire de la même façon par superposition de la Figure III.12 et la Figure III.19 (Figure III.21).

Nous observons que dans les deux cas, la rugosité des pâtes et des mortiers diminue avec l'augmentation du rapport E/C. L'augmentation du rapport E/C entraîne une diminution de la rugosité des mortiers plus rapide que les pâtes. De même, l'écart-type des deux premières valeurs de E/C des mortiers est très grand, qui peut s'expliquer par la quantité de sable dans les mortiers. Dès lors que les mortiers ont plus de sable, ils sont plus rugueux et plus poreux. Cette rugosité ou hétérogénéité de la surface des mortiers implique de ce fait une grande différence entre une mesure et une autre faite par le microscope.

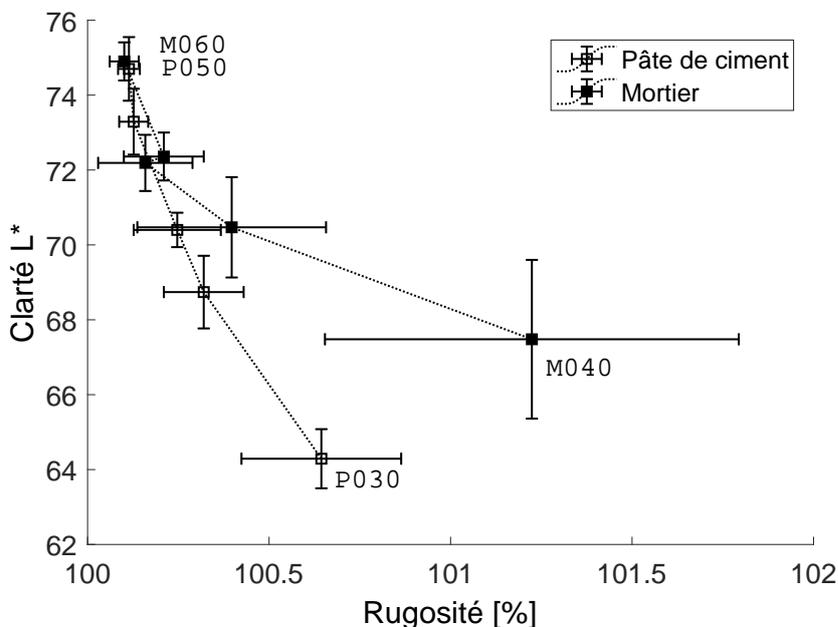


FIGURE III.22 – Variation de la clarté en fonction de la rugosité

De cette manière, si nous faisons une comparaison entre la variation de la rugosité et la variation de la clarté, nous pouvons conclure qu'une rugosité faible donne des surfaces plutôt claires, et une clarté plus importante dans les surfaces des matériaux cimentaires.

### III.3 Conclusions

Le but de ce chapitre a été de confirmer ou démentir les observations trouvés dans la littérature en relation de la variation de la clarté et de la rugosité de surfaces de matériaux cimentaires en fonction du rapport E/C. Pour cela, plusieurs échantillons de pâtes de ciment et de mortiers ont été confectionnés. Nous avons utilisé un spectrocolorimètre pour mesurer la clarté et un microscope numérique pour mesurer la rugosité ( $S_s$ ). A partir de nos essais expérimentaux nous avons observé pour les pâtes et les mortiers ce qui suit :

- La variation de la clarté est proportionnelle au rapport E/C. Cela signifie que, si le rapport E/C augmente, la clarté augmente également dans les pâtes et les mortiers. Ces résultats confirment les observation obtenu par (Infociments, 2016) et (Trub, 1973), mais sont différents aux observations de (Izoret, 2014).
- La rugosité des surfaces des matériaux dépend également du rapport E/C. Ainsi, l'augmentation du rapport E/C conduit à une diminution de la rugosité. Cela signifie qu'il existe une relation inverse entre le rapport E/C et la rugosité. Ces résultats ont la meme tendance observé par (Izoret, 2014), mais différent aux observations faits par (Lallement, 2001).

- La taille des pores de surface diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. La surface devient finement poreuse et compacte. Ces observations sont les mêmes trouvés par (TFB, 1966)

D'après nos résultats, nous avons observé que le rapport E/C de formulation dans les matériaux cimentaires a une influence non négligeable sur la variation de la teinte et de leur rugosité. Ainsi, nous avons déterminé que la réflexion de la lumière est plus importante quand la surface du matériaux est lisse, donc la surface devient plus claire. Contrairement une surface rugueuse engendrait une surfaces sombre. Alors la rugosité de la surface d'un matériau détermine la clarté d'une surface. Comme nous l'avons vu dans la théorie, une surface plane, réfléchit presque toute la lumière incidente avec une intensité lumineuse similaire, tandis qu'une surface rugueuse, réfléchira la lumière incidente dans plusieurs directions. Finalement l'intensité de la lumière réfléchie sera faible par rapport à la lumière incidente, cette diminution peut être traduite par l'assombrissement de la surface, et donc par une perte de clarté.



# CHAPITRE IV

## Rhéologie expérimentale des matériaux cimentaires

Dans ce chapitre, nous présentons une méthodologie et des résultats d'essais rhéologiques sur les pâtes de ciment et les mortiers à l'état frais. Les essais sont effectués en faisant varier le rapport E/C de la composition. Dans un premier temps, nous réalisons des mélanges de pâtes de ciment afin de déterminer la variation de la masse volumique, la concentration volumique de solides et les distances entre particules (grains de ciment dans l'eau) par rapport à la variation du rapport E/C. Ensuite, nous déterminons leurs propriétés rhéologiques, le tout, pour calculer les forces colloïdales qui sont liées à la taille et la distance entre particules de ciment. Par la suite, nous réalisons les essais sur les pâtes en utilisant le rhéomètre rotatif, et en développant deux protocoles d'essais pour choisir le plus adapté. Les valeurs expérimentales obtenues par les rhéomètres sont traitées et analysées par des méthodes numériques de régressions non-linéaires en utilisant l'algorithme de Gauss-Newton. Pour ce cas, nous utilisons dans un premier temps les lois rhéologiques classiques telles que Bingham, Casson et Herschel Bulkley. Ensuite, nous utilisons les lois modifiées par Papanastasiou. Finalement, à partir de ces résultats, nous pouvons trouver la relation entre les propriétés rhéologiques et la variation du rapport E/C dans les matériaux cimentaires étudiés.

### IV.1 Pâte de ciment

#### IV.1.1 Composition et préparations des pâtes de ciment

Les échantillons sont préparés en laboratoire (climatisé à température moyenne de 25 °C, et humidité relative de 50%) à l'aide d'un malaxeur dont le volume de bol est de 5 litres. Le ciment et l'eau sont versés dans le bol. Nous démarrons le malaxeur immédiatement à basse vitesse pendant 1 minute, puis, le malaxeur est arrêté pendant 90 secondes. La paroi latérale du bol est alors raclée avec une truelle de façon à remettre le ciment adhérent aux parois au centre du bol. Ensuite, nous reprenons le malaxage pendant 1 minute à haute vitesse. Les échantillons sont préparés à partir du ciment de type CEM I, leur composition est décrite dans le Tableau IV.1.

| Matériaux | P030 | P035  | P040 | P045  | P050 | P055  | P060 |
|-----------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Ciment(g) | 450  | 450   | 450  | 450   | 450  | 450   | 450  |
| Eau(g)    | 135  | 157.5 | 180  | 202.5 | 225  | 247.5 | 270  |

TABLE IV.1 – Composition des pâtes de ciment

### IV.1.2 Masse volumique des pâtes de ciment

La masse volumique est déterminée en suivant la norme NF EN 1015-6. La masse volumique de la pâte de ciment s'obtient par le rapport entre sa masse et le volume qu'elle occupe lorsqu'elle est introduite et compactée dans un récipient de mesurage d'une capacité donnée. L'équation de la masse volumique est donc :

$$\rho_c = \frac{m_1 - m_2}{V} \quad (\text{IV.1})$$

Où  $\rho_c$  est la densité de la pâte de ciment fraîche en  $kg/m^3$ .  $m_2$  est la masse du conteneur vide en  $Kg$ .  $m_1$  est la masse du conteneur complètement rempli la pâte de ciment compactée en  $Kg$ .  $V$  est le volume du conteneur en  $m^3$ . Les pâtes préparées sont remplies et compactées dans un récipient rigide de volume et de masse connus. Elles sont ensuite pesées sur une balance. Et enfin, nous pouvons calculer la masse volumique en utilisant la relation de l'Équation IV.1. Pour cette étape, 3 mélanges pour chaque rapport E/C sont préparés. Les résultats sont affichés dans le Tableau IV.2 et la Figure IV.1.

| Matériaux                   | P030 | P035 | P040 | P045 | P50  | P55  | P60  |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Masse volumique( $Kg/m^3$ ) | 2134 | 2038 | 1967 | 1858 | 1823 | 1770 | 1710 |

TABLE IV.2 – Masse volumique expérimentale des pâtes de ciments

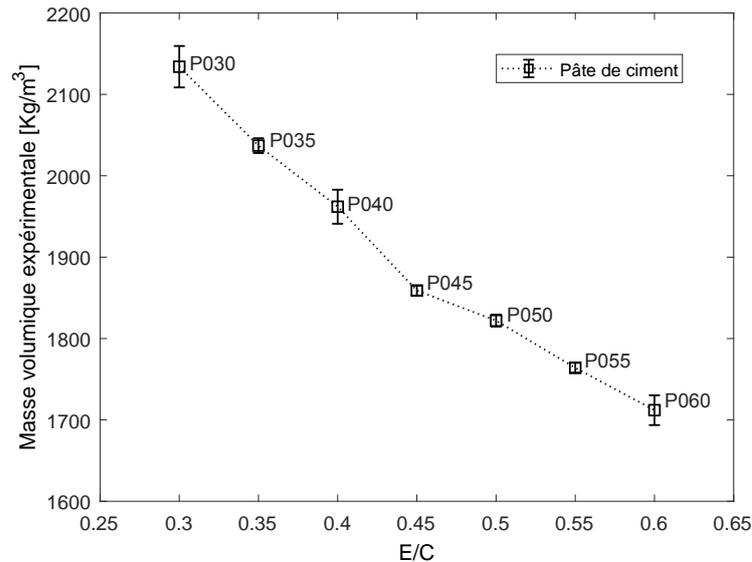


FIGURE IV.1 – Variation de la masse volumique expérimentale des pâtes de ciments

D'après nos résultats expérimentaux, nous observons que la masse volumique de nos pâtes diminue lorsque la quantité d'eau augmente. La relation entre la masse volumique et le rapport E/C est donc inverse.

### IV.1.3 Concentration de solides

La densité de ciment CEM I ( $\rho_c$ ) en poudre utilisée selon le fabricant est de  $3.09 \text{ g/cm}^3$ . La taille de particules moyennes utilisés sera de  $6.63 \mu\text{m}$  et  $2.16 \text{ (m}^2/\text{cm}^3\text{)}$  de surface spécifique (Guo et al., 2017). A partir de ces valeurs, en considérant que la distribution est homogène, nous pouvons calculer la concentration en volume de solides de particules de ciment. La pâte de ciment peut présenter des rapports E/C variant entre 0.20 et 0.60, avec une fraction volumique variant entre 0.35 et 0.60 selon la littérature. La valeur de la fraction volumique peut aller jusqu'à 55 %, toutefois, cette valeur avec la vibration peut atteindre 64 % pour des sphères uniformes (Roussel, 2012).

$$\phi = \frac{\rho_p - \rho_e}{\rho_c - \rho_e} \quad (\text{IV.2})$$

Où  $\rho_p$  est la densité du ciment en poudre.  $\rho_c$  est la densité de la pâte de ciment expérimental obtenue et  $\rho_e$  est la densité de l'eau.

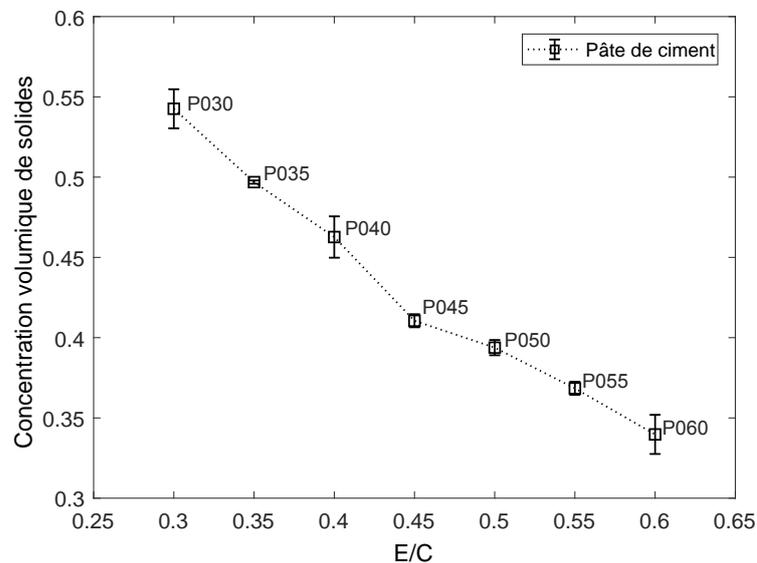


FIGURE IV.2 – Variation de la concentration volumique solide des pâtes de ciment

D'après la Figure IV.2, la concentration de volume solide diminue avec l'augmentation du rapport E/C.

### IV.1.4 Distance entre deux particules de ciment

Pour déterminer la distance entre deux particules nous allons commencer par calculer le taux de vide minimum ( $V_m$ ) à partir de la fraction volumique solide maximale ( $\phi_m$ ) :

$$V_m = \frac{1 - \phi_m}{\phi_m} \quad (\text{IV.3})$$

Selon la littérature, la fraction volumique maximale des particules sphériques de taille unique ( $\phi_m$ ) peut varier entre 0.60 et 0.64. Nous allons prendre la valeur moyenne de 0.62

pour toutes les pâtes de ciment, et nous déterminons l'excès d'eau volumique ( $W_e$ ) :

$$W_e = W_w - V_m \quad (\text{IV.4})$$

Où  $W_w$  est le rapport volumique de E/C, qui peut être calculé à partir de  $\phi$ . Maintenant nous pouvons calculer l'épaisseur du revêtement ou couche d'eau qui entoure les particules de ciment ( $T_w$ ) :

$$T_w = \frac{W_e}{A_s} \quad (\text{IV.5})$$

Où  $A_s$  est la surface des particules par unité de volume de la pâte de ciment. Finalement nous pouvons calculer la distance entre deux particules :

$$\lambda = T_w * 2 \quad (\text{IV.6})$$

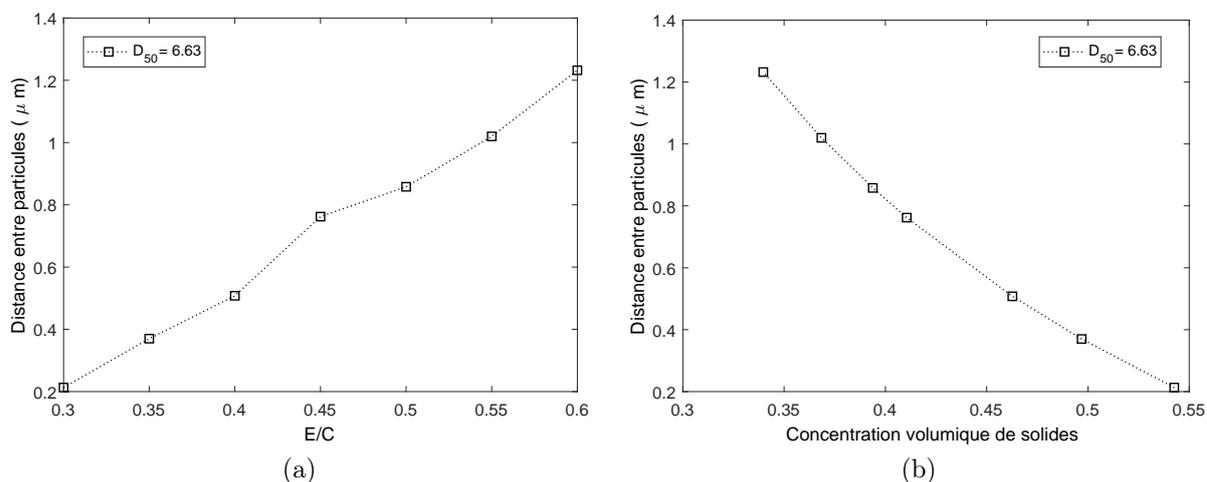


FIGURE IV.3 – Distance entre particules en fonction : (a) du rapport E/C et (b) de la concentration volumique de solides

D'après la Figure IV.3, nous pouvons observer que la distance entre particules augmente quand le rapport E/C augmente, mais diminue avec la concentration de solides.

Dans un système colloïdal, nous avons des forces dues à l'interaction entre les particules. Une de ces forces est la force de dispersion  $F$ . Nous pouvons calculer cette force de dispersion entre deux particules des rayons  $a_1$  et  $a_2$  pour de petites distances (valable pour des particules d'une taille entre 0.5 et 50  $\mu m$ ) (Flatt, 2001) :

$$F(\lambda, \bar{a}) = \frac{1}{12} A(\lambda, \bar{a}) \left( \frac{\bar{a}}{\lambda^2} \right) \quad (\text{IV.7})$$

Où  $\bar{a}$  est la moyenne des rayons de deux particules en interaction et  $A_{(\lambda)}$  est la constante de Hamaker retardée. Lors de grandes séparations, la constante de Hamaker retardée se développe de façon exponentielle :

$$\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} A(\lambda) = a * \exp(-b\lambda) \quad (\text{IV.8})$$

Où  $a$  et  $b$  sont des paramètres d'ajustement.

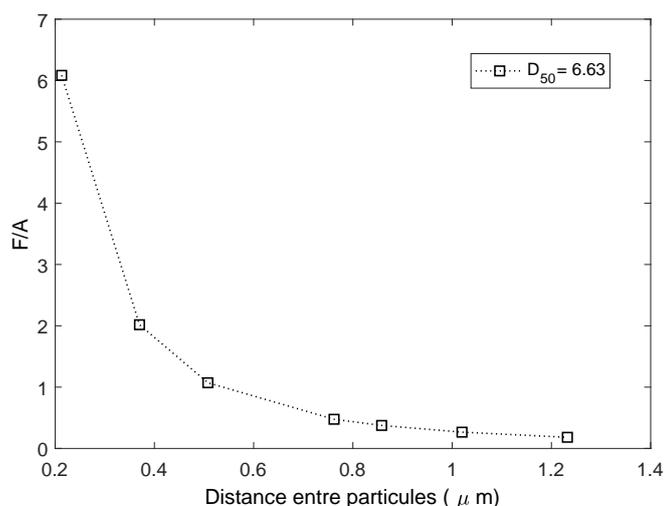


FIGURE IV.4 – Force de dispersion attrayante en fonction de la distance entre particules

A partir de la Figure IV.4 nous pouvons observer que la diminution de la distance entre deux particules génère une augmentation exponentielle de la force dispersive dans les suspensions cimentaires. Cette force de dispersion serait l'une des forces déterminant le seuil de cisaillement dans les matériaux cimentaires.

## IV.1.5 Essais rhéologiques

### a. Équipement

Pour étudier la rhéologie des pâtes de ciment, nous utilisons un rhéomètre à rotation "RheolabQC" disponible au laboratoire de l'IRC-ESTP (Figure IV.5a). Ces rhéomètres permettent d'obtenir des données expérimentales de contraintes de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction des taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ). Les données expérimentales obtenues peuvent être utilisées pour tracer la variation des contraintes de cisaillement par rapport au taux de cisaillement. Il existe plusieurs configurations de géométrie mobile plus ou moins adaptées pour mesurer le comportement rhéologique de différents matériaux. Parmi ces géométries, trois d'entre elles sont présents dans notre laboratoire. Une géométrie cylindrique ("CC27") d'un diamètre de 27 mm, une géométrie vane à 4 lames ("ST16 – 4V – 25/100") d'un diamètre de 16 mm avec une hauteur de 25 mm, et un géométrie à 6 lames ("ST24 – 2D/2V/2V – 30/109") d'un diamètre de 24 mm et d'une hauteur de 30 mm (Figure IV.5b). Pour mesurer le comportement rhéologique, nous préparons d'abord le mélange. Une fois que le mélange de pâte est prêt, il est introduit dans la cellule de mesure du rhéomètre. Le rhéomètre a une géométrie mobile qui est attachée à un moteur, qui le fait tourner.

### b. Protocole des essais

Les mesures rhéologiques sont effectuées sur la période dite "période initiale d'hydratation" des pâtes de ciment. C'est une période où le taux d'hydratation est quasi nul. De ce fait il n'y a pas de changement significatif dans le comportement rhéologique des pâtes. L'écart de temps entre la préparation des mélanges de pâte et l'essai rhéologique est inférieur à 10

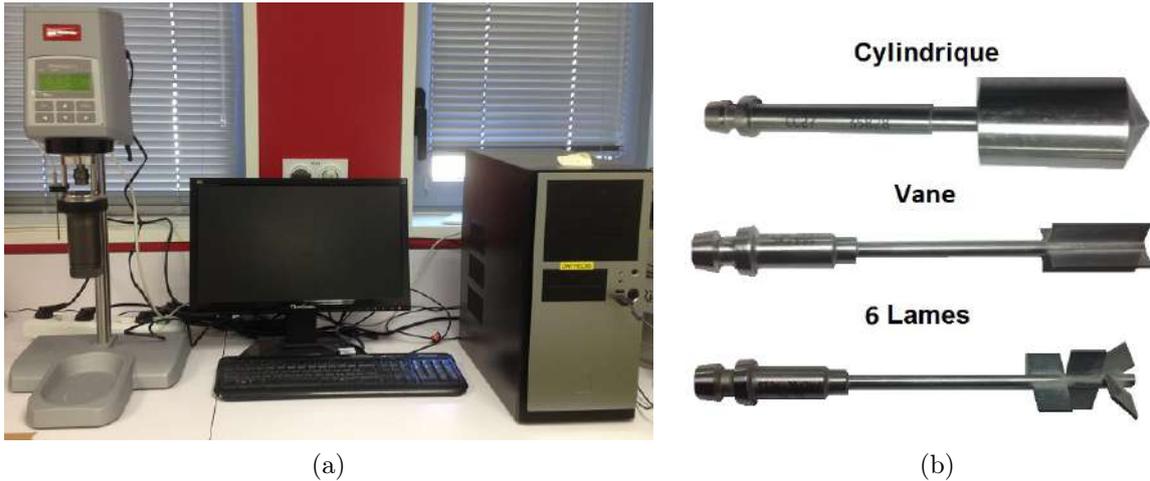


FIGURE IV.5 – Présentation de l'équipement : (a) Rhéomètre RheolabQC et (b) Géométries

minutes. Avant d'effectuer nos essais, il est important de sélectionner la géométrie la plus adaptée. Selon la littérature, on peut voir qu'une géométrie cylindrique est très adaptée pour analyser des fluides homogènes. Mais dès lors que l'on veut étudier des fluides complexes tels que les suspensions, la géométrie des ailettes (vane) est fortement recommandée. Dans ce cas, les pâtes de ciment, les mortiers et les bétons peuvent être considérés comme des suspensions. Par conséquent, il est idéal d'utiliser cette géométrie. L'un des grands avantages de l'utilisation de la géométrie vane est que le contact entre les matériaux cimentaires et la géométrie évite le glissement (Saak et al., 2001).

Comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent, la rhéologie est une science très complexe. Il est difficile de trouver des valeurs exactes à la réalité. De nombreuses erreurs dans la mesure et l'interprétation des résultats pourraient se produire, ce qui, à la fin, nous donnerait des conclusions erronées. Étant donné que les résultats varient en fonction du type de matériau à mesurer, l'équipement utilisé pour effectuer la mesure ou la méthode utilisée, nous ne pouvons pas donner une valeur exacte pour un matériau défini. L'objectif de notre travail est de faire le lien entre les principales propriétés rhéologiques (seuil et viscosité) des matériaux cimentaires et leur aspect (couleur et rugosité) une fois durcis. Pour déterminer les propriétés rhéologiques de nos pâtes de ciment, nous préparerons deux protocoles d'essais à contrainte imposée (a et b), l'un sans pré-cisaillement et l'autre avec pré-cisaillement.

Le protocole (a) consiste à soumettre la pâte de ciment à une contrainte croissante pendant 60 secondes à une vitesse d'un point de mesure par 0.1 seconde. Le nombre total de points moyens est de 600 points (Figure IV.6a). Le protocole (b) consiste à soumettre la pâte de ciment à un taux de cisaillement de  $500\text{ s}^{-1}$  pendant 30 secondes (pré-cisaillement). Les pâtes sont laissées au repos pendant 30 secondes, avant d'être soumise à une contrainte croissante pendant 60 secondes, à une vitesse d'un point de mesure par 0.1 seconde, pour un total de 600 points de mesure. Dans les deux cas, nous avons fait croître la contrainte selon un pas très fin et régulier, afin de déterminer précisément le point d'écoulement des pâtes. Faire croître rapidement la contrainte pourrait générer différentes valeurs de seuil dans une même pâte. Dans le protocole (b), nous avons choisit de soumettre les pâtes à un pré-cisaillement de  $500\text{ s}^{-1}$ . Ceci, pour casser la structure afin d'obtenir un mélange plus homogène. Par ailleurs, en considérant que la pâte de ciment est un système colloïdal lié par une force d'interaction, le mélange de la pâte permettrait aux forces d'interaction présentes dans la pâte d'être les mêmes dans tout le mélange au lancement de l'essai. Pour nos essais, nous utilisons la pâte

ayant un rapport E/C de 0.50 (P050). Les résultats sont présentés sur la Figure IV.7.

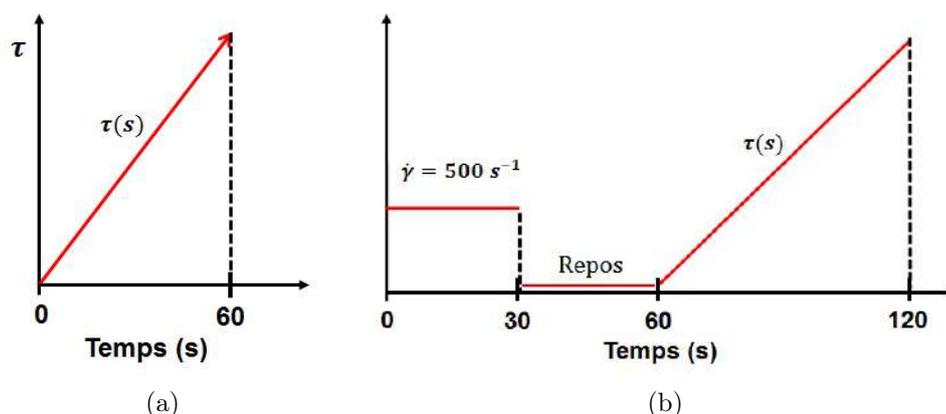


FIGURE IV.6 – Présentation des protocoles pour les essais rhéologiques de pâtes de ciment : a) Sans pré-cisaillement et b) avec pré-cisaillement.

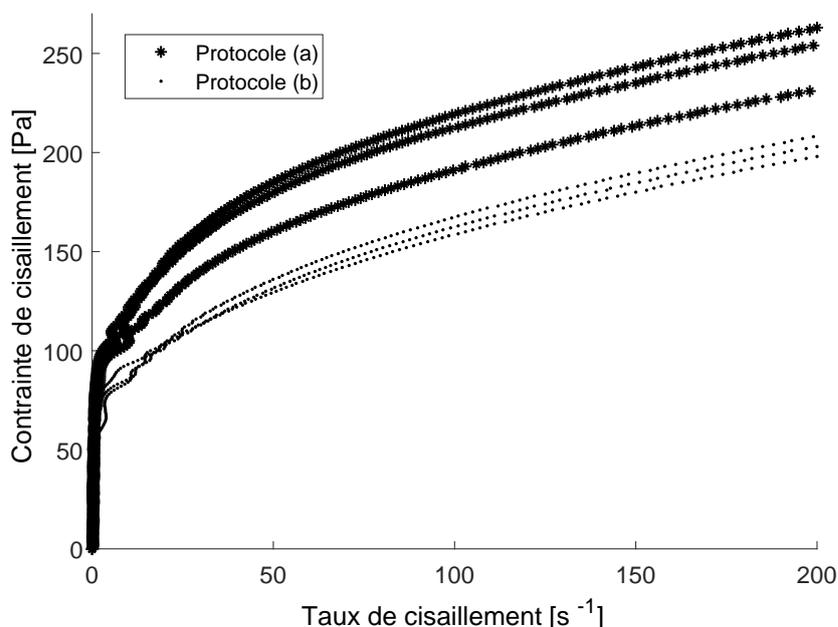


FIGURE IV.7 – L'influence du pré-cisaillement pour les pâtes de ciment P050 avec pré cisaillement et sans pré cisaillement

À partir de la (Figure IV.7), nous observons une différence nette entre les courbes d'écoulement obtenues par le protocole (a) (P050<sub>1</sub>) et les courbes d'écoulement obtenues par le protocole (b) (P050<sub>2</sub>). Les courbes d'écoulement obtenues par le premier protocole sont très éloignées les unes des autres. En revanche, les courbes obtenues par le protocole (b) sont très proches les unes des autres. Nous constatons que le protocole (b) diminue la dispersion des résultats. De ce fait nous privilégions le protocole (b) pour nos essais sur les pâtes de ciment.

Une fois le type de protocole d'essais choisi, nous effectuons des essais pour déterminer l'influence du type de géométrie sur les courbes d'écoulement. Pour cela, nous utilisons les 3 géométries disponibles dans le laboratoire (cylindrique, vane et 6 lames). Ces essais nous permettent de savoir si les courbes d'écoulement d'une pâte donnée varient selon la géométrie. Les résultats de ces essais sont présentés à la Figure IV.8.

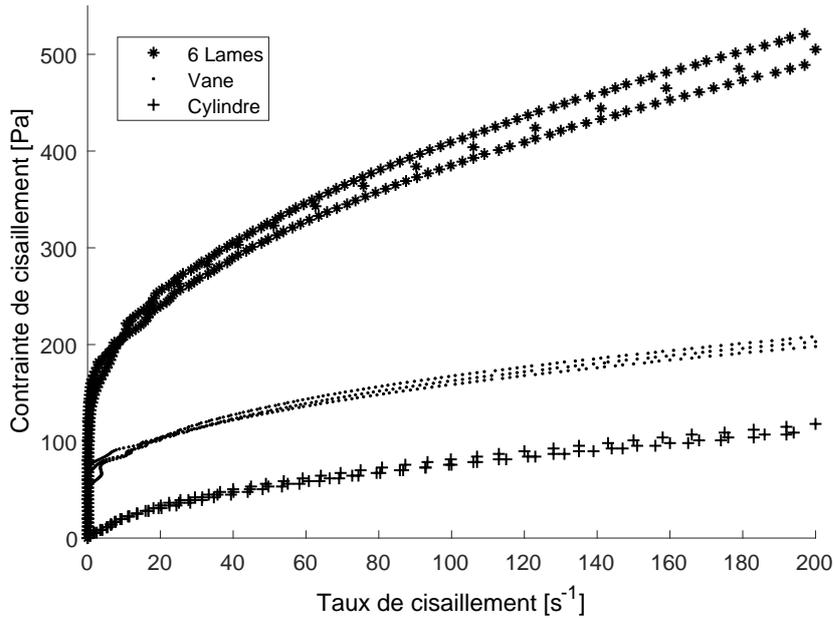


FIGURE IV.8 – Influence du type géométrie sur la courbe d’écoulement des pâtes P050 : 6 lames, vane et cylindrique.

À partir de la figure Figure IV.8, nous observons que la géométrie influence les résultats finaux. Par conséquent, nous avons obtenu trois courbes d’écoulement totalement différentes : des courbes d’écoulement avec des seuils d’écoulement très faibles lors de l’utilisation d’une géométrie cylindrique en comparaison aux autres géométries. Ces valeurs obtenues peuvent être faibles, en raison de la formation d’une couche de glissement qui existe entre la géométrie et la pâte. Cette couche provoque le glissement de la géométrie. Ces couches de glissement ont une épaisseur comprise entre 0,1 et 10 microns (Saak et al., 2001). Pour les autres géométries (Vane à 4 lames et 6 lames), il n’y a pas de glissement. La contrainte nécessaire pour faire tourner la géométrie étant plus grande, les valeurs de contrainte doivent alors être plus élevées. La différence entre la géométrie à 4 lames (Vane) et la géométrie à 6 lames est dans sa forme et sa taille. Le diamètre de rotation et la taille de la géométrie avec 6 lames est plus grand par rapport à la géométrie Vane. Cela conduit à obtenir des valeurs de contrainte plus importantes pour la géométrie à 6 lames. Nous avons vu dans la littérature que le type de géométrie définit le seuil d’écoulement et la forme de la courbe d’écoulement d’un fluide. Une géométrie cylindrique nécessite moins de force pour produire l’écoulement de fluide. La formation d’une fine couche liquide entre le cylindre et le matériau favorise le glissement. Tandis qu’une géométrie Vane à 4 lames nécessite plus de force de par une friction plus importante, et un mouvement du matériau. De cette manière, le moment de torsion ( $M$ ) peut être calculé en fonction du nombre de lames dans une géométrie Vane. L’augmentation du nombre de lames provoque l’augmentation du moment de torsion nécessaire pour déformer un fluide newtonien par exemple (Barnes and Nguyen, 2001) :

$$M = \left( A \frac{l}{a} + B \right) 2\pi\eta a^3 \omega \quad (\text{IV.9})$$

où  $A$  et  $B$  sont des constantes qui dépendent du nombre de lames ( $A$  et  $B$  augmentent avec l’augmentation du nombre de lames),  $a$  est le rayon ( $m$ ),  $l$  est la largeur de la géométrie ( $m$ ),  $\eta$  est la viscosité du fluide ( $Pa.s$ ) et  $\omega$  est le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ).

Ainsi, le seuil peut être calculé en fonction du nombre de lames, de la largeur et du rayon

de la géométrie utilisée. Avec nos résultats nous confirmons ce qui a été dit dans la littérature sur l'influence de la géométrie dans l'écoulement d'un fluide.

Un autre aspect important à considérer dans l'étude de la rhéologie des matériaux cimentaires est le temps d'hydratation. Le temps d'hydratation influence directement le comportement rhéologique des pâtes. Il est de ce fait nécessaire de réaliser des essais rhéologiques en fonction du temps. Cela implique de connaître le temps maximum durant lequel nous pouvons utiliser la même pâte et obtenir les mêmes résultats avant la prise. Selon le fabricant du type de ciment que nous utilisons (CEM I), le temps de prise est de 150 minutes. Cela signifie que nous avons environ 2 heures pour manipuler nos pâtes et effectuer les essais que nous voulons pour obtenir les mêmes résultats. Pour vérifier cela nous réalisons des essais rhéologiques avec deux types de pâtes (P050 et P060). Les essais rhéologiques réalisés en suivant le protocole (b) sur une géométrie à vane nous permettent d'analyser l'évolution des courbes d'écoulement par rapport au temps d'hydratation. Une fois que les pâtes sont préparées, les pâtes sont analysées immédiatement (temps zéro). Ensuite, nous attendons une heure et nous analysons à nouveau les mêmes pâtes (une heure après). Nous attendons encore une heure et nous analysons à nouveau les mêmes pâtes (2 heures). Enfin, nous analysons la pâte après 3 heures. Les résultats sont représentés sur la Figure IV.9.

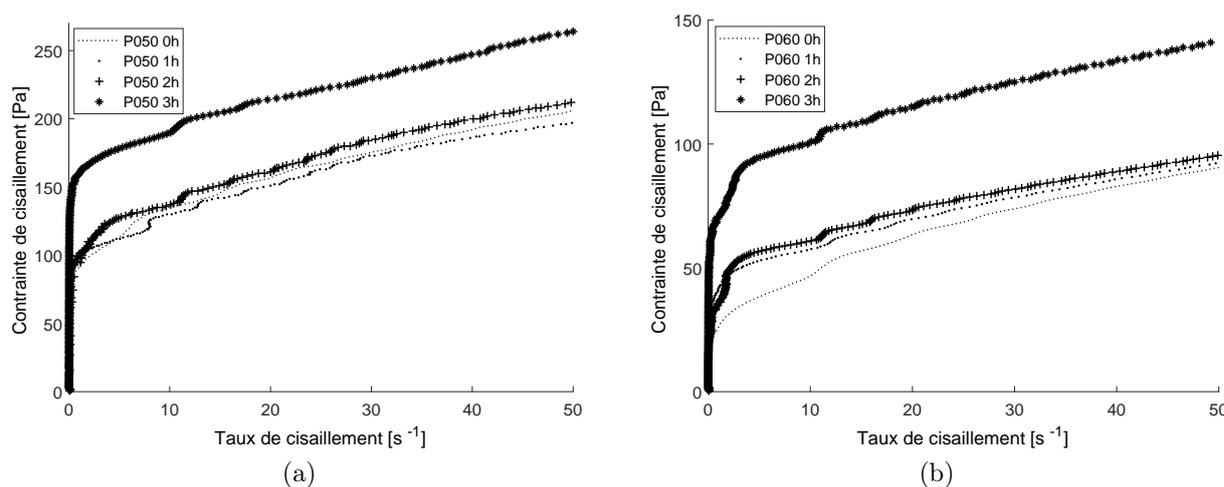


FIGURE IV.9 – Variation du comportement rhéologiques des pâtes de ciment en fonction du temps d'hydratation : (a) P050 et (b) P060

La Figure IV.9 montre l'influence du temps d'hydratation sur la rhéologie des pâtes de ciment. Selon nos résultats, les courbes d'écoulement à 0, 1 et 2 heures sont similaires. En revanche, la courbe obtenue après 3 heures est totalement différente des courbes précédentes. Cela confirme le fait que le temps de prise de notre ciment est après 2 heures (exactement 150 minutes). Nos résultats confirment que nous avons environ 2 heures pour effectuer les mesures rhéologiques sur une même pâte. De nos résultats, nous pouvons dire que nous avons environ 2 heures pour effectuer nos essais rhéologiques sur la même pâte.

Selon nos courbes d'écoulement des pâtes de ciment obtenues précédemment, l'écoulement commence à partir d'une contrainte seuil  $\tau_0$ . Mais pour avoir une idée précise sur le point d'écoulement sous contrainte, nous avons besoin de connaître l'écoulement à faible taux de cisaillement. Pour cela nous étudions les courbes d'écoulement des 4 pâtes P050 avant un taux de cisaillement de  $1s^{-1}$  (Figure IV.10). D'après ces courbes, nous observons 3 zones : La zone I inférieur à environ 12 Pa lorsque l'essai rhéologique commence ; Dans cette zone nous voyons une perturbation des données obtenues pouvant être dûe au positionnement initial

de la géométrie. La zone II qui fluctue entre 12 et 33 Pa, appelée zone de non-écoulement, et dans laquelle, le fluide reste immobile avec un faible taux de cisaillement. La zone de non-écoulement regroupe le domaine qui est inférieur au seuil de cisaillement et peut faire partie de la zone d'écoulement à faible taux de cisaillement non détectable par le rhéomètre. Enfin la zone III supérieure à 33 Pa, appelée la zone d'écoulement ; C'est une zone où le fluide commence à s'écouler et la contrainte d'écoulement du fluide augmente en même temps que le taux de cisaillement.

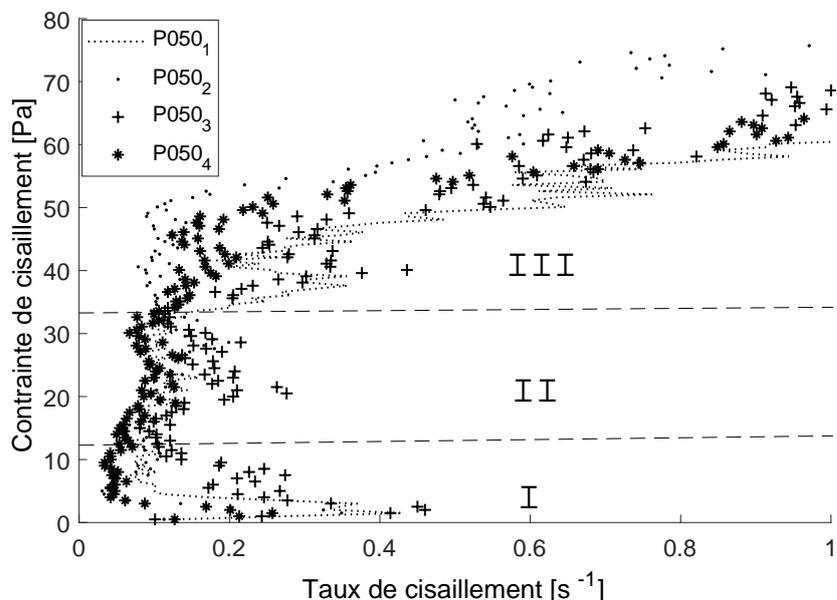


FIGURE IV.10 – Courbe rhéologique d'une pâte de ciment P050 et les zones d'écoulement

## IV.1.6 Variation de la rhéologie des pâtes en fonction du rapport E/C

Pour déterminer la variation du seuil de cisaillement et de la viscosité de pâtes de ciment en fonction du rapport E/C. Nous mesurons d'abord le comportement rhéologique de chaque pâte dans le rhéomètre, puis, nous prenons environ 3 courbes d'écoulement de chaque pâte pour déterminer les paramètres rhéologiques. Les paramètres rhéologiques sont déterminés par la régression numérique en utilisant la méthode de Gauss-Newton (voir annexe).

### a. Modèles classiques

Le comportement rhéologique de la pâte de ciment peut être déterminé à partir des modèles classiques dont les données expérimentales sont prises en compte à partir de la zone II (point d'écoulement de Figure IV.10). Nous allons rappeler les modèles classiques utilisés.

#### *Bingham*

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{IV.10})$$

*Casson*

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad (\text{IV.11})$$

*Herschel Bulkley*

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{IV.12})$$

Un tableau récapitulatif de toutes les paramètres rhéologiques obtenus pour les pâtes de ciment selon chaque modèle classique utilisé est présenté (Tableau IV.3). Pour faire l'ajustement non linéaire, nous prenons les données expérimentales d'un échantillon de la pâte P030. Pour les P035, nous prenons 2 échantillons et pour le reste 3 échantillons (P040, P045 et P050).

| Échantillon | P030     |       |       |       | P035     |       |      |       | P040     |       |       |       |
|-------------|----------|-------|-------|-------|----------|-------|------|-------|----------|-------|-------|-------|
| Modèle      | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | $R^2$ |
| Bingham     | 1857     | 0.94  | -     | 0.96  | 558      | 0.61  | -    | 0.98  | 218      | 0.58  | -     | 0.94  |
| Casson      | 1556     | 0.18  | -     | 0.99  | 397      | 0.2   | -    | 0.84  | 176      | 0.19  | -     | 0.98  |
| Herschel B  | 1728     | -     | 11.02 | 0.99  | 533      | -     | 0.83 | 0.98  | 136      | -     | 17.59 | 0.98  |
| Échantillon | P045     |       |       |       | P050     |       |      |       | P055     |       |       |       |
| Modèle      | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | $R^2$ |
| Bingham     | 113      | 0.41  | -     | 0.92  | 95       | 0.35  | -    | 0.92  | 61       | 0.24  | -     | 0.93  |
| Casson      | 98       | 0.15  | -     | 0.97  | 81       | 0.13  | -    | 0.97  | 50       | 0.09  | -     | 0.98  |
| Herschel B  | 44       | -     | 17.48 | 0.99  | 40       | -     | 0.48 | 0.99  | 21       | -     | 8.75  | 0.99  |
| E/C         | P060     |       |       |       |          |       |      |       |          |       |       |       |
| Modèle      | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | $R^2$ |          |       |      |       |          |       |       |       |
| Bingham     | 42       | 0.19  | -     | 0.93  |          |       |      |       |          |       |       |       |
| Casson B    | 33       | 0.08  | -     | 0.97  |          |       |      |       |          |       |       |       |
| Herschel    | 11       | -     | 5.96  | 0.99  |          |       |      |       |          |       |       |       |

TABLE IV.3 – Paramètres rhéologiques obtenues para la régression numérique de Gauss-Newton en fonction des différents modèles classiques

A partir du tableau récapitulatif, les courbes d'écoulement de contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement selon chaque modèle classique sont tracés (Figure IV.11). Les courbes d'écoulement ont été tracées sur une gamme de vitesses allant de 0 à 1000  $s^{-1}$ . L'intérêt d'obtenir et d'utiliser des données expérimentales jusqu'à 1000  $s^{-1}$  est de faciliter le calcul numérique avec notre logiciel. Cette amplitude permet de trouver des points de convergence lors de la simulation numérique. Un calcul numérique avec une amplitude plus faible (jusqu'à 200  $s^{-1}$ ), présentait des difficultés de convergence lors de la simulation.

Nous avons envisagé d'obtenir des données expérimentales jusqu'à 1000 secondes, car les données obtenues jusqu'à 200 secondes par exemple ont généré des problèmes de calcul lors de la simulation, ceci étant dû à l'absence de points de convergence lors du calcul numérique.

A partir de la Figure IV.11, au premier regard, nous observons une la diminution du seuil de cisaillement et de la pente (viscosité) de chaque courbe lorsque le rapport E/C augmente. Pour la pâte P030, au début nous observons après le premier écoulement un relâchement qui peut être dû au glissement de la géométrie. D'une manière générale, les modèles classiques sont bien adaptés pour décrire le comportement rhéologiques des pâtes de ciment quelque soit le rapport E/C ( $R^2$  supérieur à 0.99). D'après nos résultats d'ajustement nos linéaire (Tableau IV.3), nous pouvons déterminer les modèles adaptés pour décrire le comportement

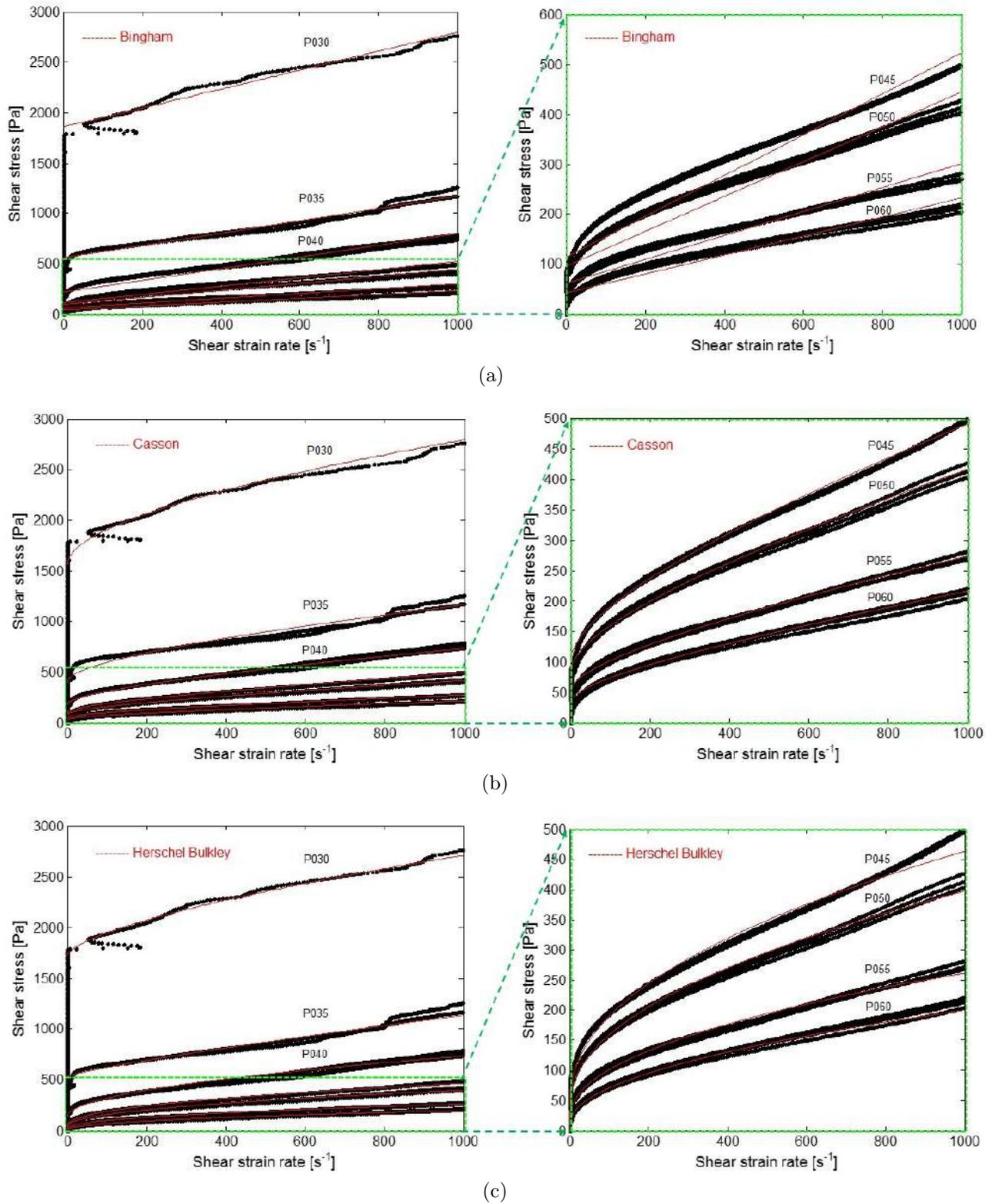


FIGURE IV.11 – Comportement rhéologique des pâtes de ciment (P030, P035, P040, P045, P050, P055 et P060) déterminés à partir des lois classiques : (a) Bingham, (b) Casson et (c) Herschel Bulkley

des pâtes de ciment selon la valeur  $R^2$  (Coefficient de détermination). Selon nos résultats, le modèle Herschel Bulkley avec  $R^2$  supérieur à 0.98 est le plus adapté pour décrire les pâtes de ciment quel que soit le rapport E/C. Le modèle Bingham ( $R^2$  supérieur à 0.93) est le moins

adapté par rapport aux autres modèles. Le modèle Casson ( $R^2$  supérieur à 0.84) est moins adapté pour les pâtes P030 et P035, mais pour les pâtes à grand rapport E/C (P040, P045, P050, P055 et P060), il est bien adapté.

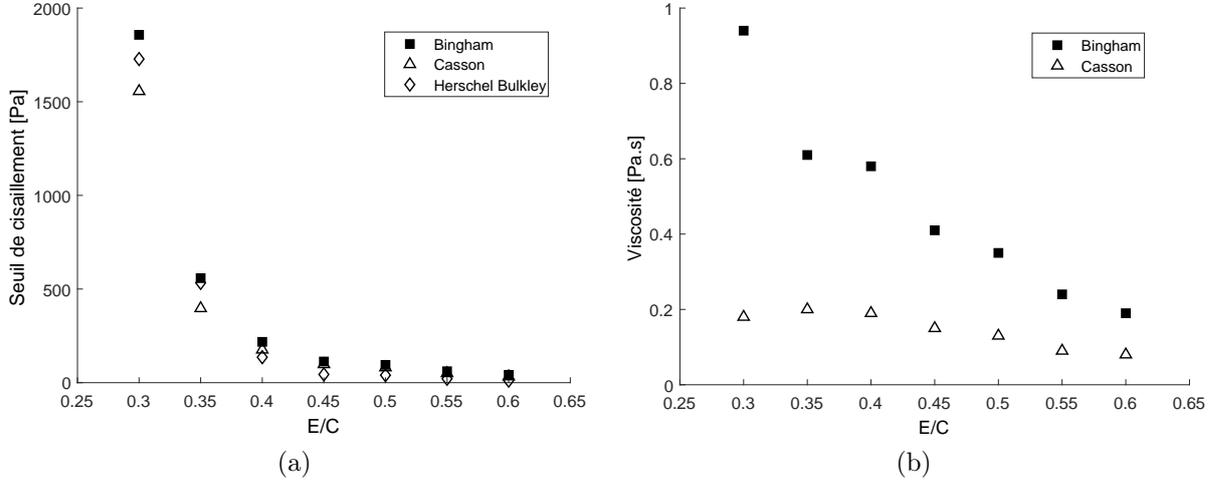


FIGURE IV.12 – Variation selon le rapport E/C : (a) du seuil de cisaillement et (b) de la viscosité à partir des modèles classiques

D'après la Figure IV.12, le seuil diminue avec l'augmentation du rapport E/C quelque soit le modèle classique utilisé. Quand le rapport E/C tend vers 0, le seuil tend vers l'infini, et quand le rapport E/C tend vers l'infini, le seuil va devenir 0. En effet, il n'y aura plus que de l'eau (fluide newtonien). De la même façon, la viscosité diminue selon le modèle Bingham. Pour le modèle Casson la viscosité ne présente pas une variation visible de la viscosité. Une remarque importante est de voir que la différence du rapport contrainte/seuil (viscosité) entre le modèle Bingham et Casson est très grande, avec une viscosité selon Bingham jusqu'à 4 fois supérieure à Casson. Nous n'avons pas représenté la viscosité selon le modèle Herschel Bulkley, car Herschel Bulkley propose un paramètre  $K$  de consistance.

## b. Modèles modifiés

De la même façon, le comportement rhéologique de la pâte de ciment peut être déterminé par ajustement en utilisant les modèles modifiés par Papanastasiou. Pour cet ajustement toutes les données expérimentales sont prises en compte. Nous préparons un tableau récapitulatif de tous les paramètres rhéologiques obtenus pour les pâtes de ciment selon chaque modèle modifié utilisé (Tableau IV.4). Nous rappelons les modèles mathématiques modifiés utilisés.

### *Bingham-Papanastasiou*

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 - \exp(-m\dot{\gamma}) \right] + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{IV.13})$$

### *Casson-Papanastasiou*

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} \left[ 1 - \exp(-\sqrt{m\dot{\gamma}}) \right] + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad (\text{IV.14})$$

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 - \exp(-m\dot{\gamma}) \right] + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{IV.15})$$

| Échantillon    | P030     |       |       |       |       | P035     |       |      |       |       |
|----------------|----------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|------|-------|-------|
| Modèle         | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | m     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | m     | $R^2$ |
| Bingham - P    | 1799     | 1.02  | -     | 38.95 | 0.89  | 508      | 0.69  | -    | 8.79  | 0.97  |
| Casson - P     | 1680     | 0.12  | -     | 92.67 | 0.88  | 441      | 0.16  | -    | 22.56 | 0.97  |
| Herschel B- P  | 1703     | -     | 10.33 | 42.08 | 0.98  | 469      | -     | 4.42 | 10.03 | 0.97  |
| Échantillon    | P040     |       |       |       |       | P045     |       |      |       |       |
| Modèle         | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | m     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | m     | $R^2$ |
| Bingham - P    | 252      | 0.53  | -     | 1.37  | 0.98  | 158      | 0.035 | -    | 0.15  | 0.98  |
| Casson - P     | 182      | 0.19  | -     | 5.73  | 0.99  | 93       | 0.16  | -    | 22.47 | 0.99  |
| Herschel B - P | 191      | -     | 6.16  | 2.65  | 0.99  | 75       | -     | 8.89 | 18.33 | 0.99  |
| Échantillon    | P050     |       |       |       |       | P055     |       |      |       |       |
| Modèle         | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | m     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | m     | $R^2$ |
| Bingham - P    | 134      | 0.29  | -     | 0.11  | 0.97  | 87       | 0.19  | -    | 0.08  | 0.98  |
| Casson - P     | 77       | 0.13  | -     | 34.88 | 0.99  | 49       | 0.09  | -    | 2.75  | 0.99  |
| Herschel B - P | 60       | -     | 7.98  | 29.63 | 0.99  | 41       | -     | 4.01 | 1.75  | 0.99  |
| Échantillon    | P60      |       |       |       |       |          |       |      |       |       |
| Modèle         | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | m     | $R^2$ |          |       |      |       |       |
| Bingham - P    | 65       | 0.15  | -     | 0.04  | 0.99  |          |       |      |       |       |
| Casson - P     | 34       | 0.07  | -     | 0.37  | 0.99  |          |       |      |       |       |
| Herschel B - P | 19       | -     | 4.15  | 1.87  | 0.99  |          |       |      |       |       |

TABLE IV.4 – Paramètres rhéologiques obtenues para la régression numérique de Gauss-Newton en fonction des différents modèles modifiés

A partir du tableau récapitulatif de paramètres obtenues par ajustement non linéaire, nous pouvons dessiner les contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement selon chaque modèle modifié (Figure IV.13).

D’après la Figure IV.13 et nos paramètres rhéologiques obtenues dans le Tableau IV.4, nous pouvons déterminer les modèles adaptés pour décrire le comportement des pâtes de ciment. Le modèle Herschel Bulkley Papanastasiou avec  $R^2$  supérieur à 0.97 est le bien adapté pour décrire les pâtes de ciment quel que soit le rapport E/C. Le modèle Bingham-Papanastasiou avec  $R^2$  de 0.89 est le moins adapté pour la pâte P030, mais est bien adapté pour le reste ( $R^2$  supérieur à 0.97). Le modèle Casson avec  $R^2$  0.88 est le moins adapté pour la pâte P030 mais pour le reste est bien adapté pour un  $R^2$  supérieur à 0.97. Finalement, d’après nos résultats, tous les modèles modifiés sont bien adaptés pour décrire le comportement de pâtes de ciment avec un rapport de E/C supérieur de 0,35.

D’après les paramètres rhéologiques obtenus par ajustement non linéaire à partir de nos données expérimentales, nous avons également dessiné la variation de seuil et de la viscosité selon la variation du rapport E/C.

La Figure IV.14, nous montre que le seuil de cisaillement diminue avec l’augmentation du rapport E/C quelque soit le modèle modifié utilisé. De la même façon que dans les modèles classiques, si le rapport E/C tend vers 0, le seuil tend vers l’infini, et si le rapport E/C tend vers l’infini, le seuil devient 0 (fluide newtonien). D’autre part, la viscosité diminue avec

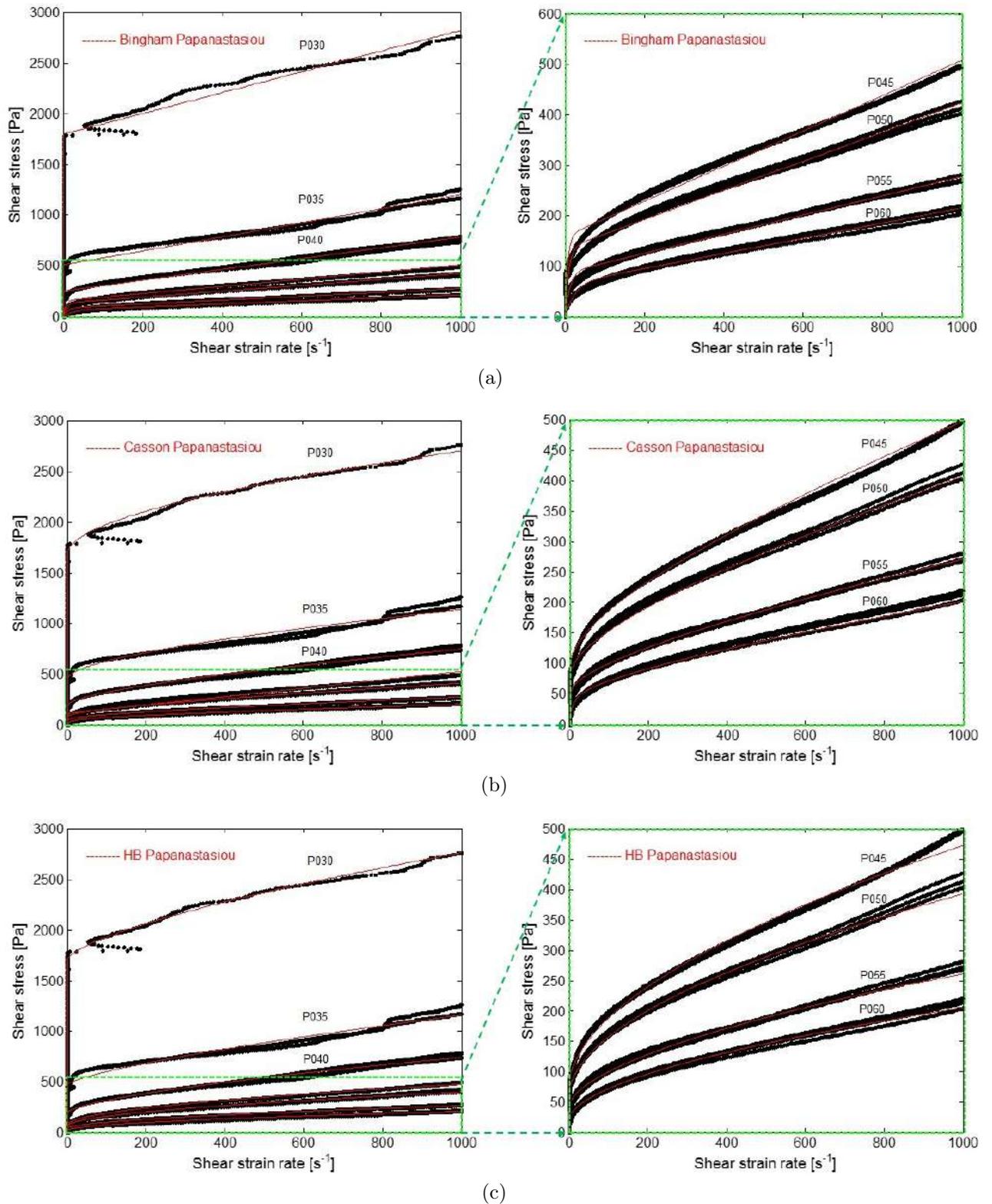


FIGURE IV.13 – Comportement rhéologique des pâtes de ciment (P030, P035, P040, P045, P050, P055 et P060) déterminés à partir des lois modifiés par Papanastasiou : (a) Bingham Papanastasiou, (b) Casson Papanastasiou et (c) Herschel Bulkley Papanastasiou

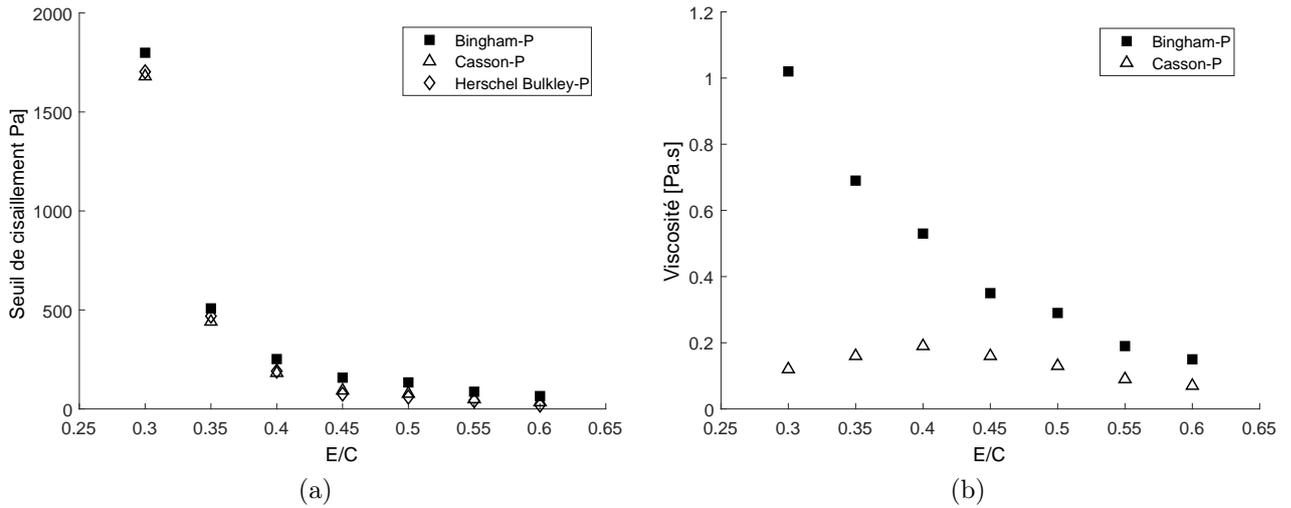


FIGURE IV.14 – Présentation de différents paramètres obtenu avec les modèles modifiés selon le rapport  $E/C$  : (a) Variation du seuil de cisaillement et (b) Variation de la viscosité

l'augmentation du rapport  $E/C$  selon le modèle Bingham-Papanastasiou. En revanche, pour le modèle Casson-Papanastasiou, la variation de la viscosité n'est pas visible. Comme pour les modèles classiques, les viscosités selon Casson-Papanastasiou sont très petites par rapport à les viscosités selon la loi Bingham-Papanastasiou.

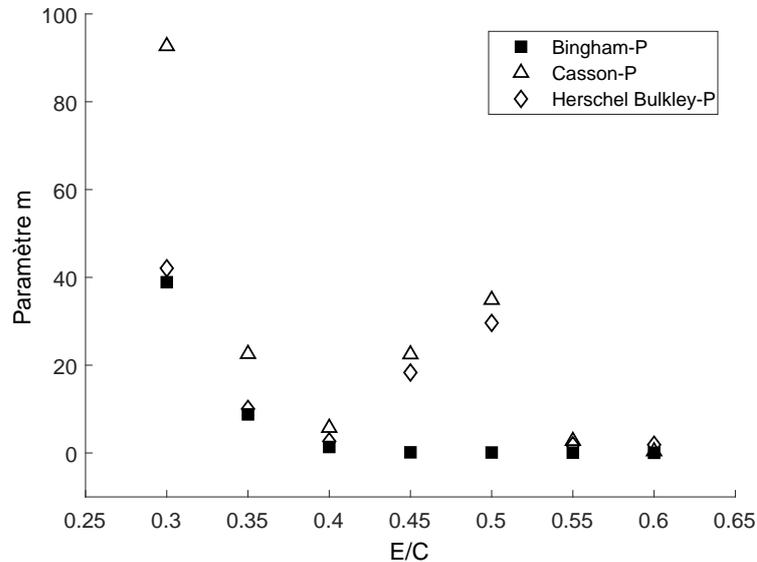


FIGURE IV.15 – Variation du paramètre  $m$  en fonction du rapport  $E/C$  selon les modèles modifiés

Nous pouvons également analyser la variation de  $m$  selon le rapport  $E/C$  à partir de la Figure IV.15. Le paramètre  $m$  diminue avec l'augmentation du rapport  $E/C$  pour le modèle Bingham Papanastasiou. Pour les autres modèles (C-P et HB-P), il y a diminution jusqu'à  $E/C=0.40$ , et ensuite augmente jusqu'à atteindre le rapport  $E/C=0.50$  pour finalement diminuer. C'est-à-dire, que la variation de la viscosité n'est pas cohérente.

## Analyse générale des résultats

A partir de la technique d'ajustement de Gauss-Newton et de nos résultats expérimentaux, nous déterminons la variation des propriétés rhéologiques des pâtes de ciment en fonction du rapport E/C selon différents modèles mathématiques. Nous traçons les variations de seuil, de la viscosité et du paramètre  $m$  selon chaque modèle utilisé. Finalement, à partir des coefficients de détermination  $R^2$ , nous déterminons les modèles les plus adaptés.

Selon nos résultats, nous observons que le seuil diminue avec l'augmentation du rapport E/C, quelque soit le modèle utilisé. La viscosité diminue selon le modèle Bingham et Bingham Papanastasiou, mais pour les modèles Casson et Casson Papanastasiou, la viscosité augmente légèrement pour finalement diminuer avec l'augmentation du rapport E/C. Les viscosités selon Casson et Casson Papanastasiou sont très petites par rapport aux modèles Bingham et Bingham Papanastasiou. D'autre part le paramètre  $m$  diminue avec l'augmentation du rapport E/C pour le modèle Bingham Papanastasiou. Pour les autres modèles, il n'y a pas de tendance bien définie. A partir des coefficients de détermination  $R^2$ , nous déterminons le modèle adapté pour décrire le comportement rhéologique de la pâte de ciment frais. Les modèles adaptés pour décrire le comportement des pâtes sont Herschel Bulkley, Bingham-Papanastasiou, Casson-Papanastasiou et Herschel Bulkley-Papanastasiou. Parmi tous ces modèles adaptés, les paramètres obtenus par la méthode de Bingham-Papanastasiou ont une tendance bien définie. Ainsi, selon ce modèle tous les paramètres obtenus (seuil de cisaillement, viscosité et  $m$ ) diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. Nous considérons que ces résultats sont cohérents, donc, nous choisissons ce modèle pour nos prochaines analyses et la simulation numérique d'écoulement de pâtes (Tableau IV.5).

| Modèle      | Bingham Papanastasiou |       |       |
|-------------|-----------------------|-------|-------|
| Échantillon | $\tau_0$              | $\mu$ | $m$   |
| P030        | 1799                  | 1.02  | 38.95 |
| P035        | 558                   | 0.69  | 8.79  |
| P040        | 252                   | 0.53  | 1.37  |
| P045        | 158                   | 0.35  | 0.15  |
| P050        | 134                   | 0.29  | 0.11  |
| P055        | 87                    | 0.19  | 0.08  |
| P060        | 65                    | 0.15  | 0.04  |

TABLE IV.5 – Paramètres rhéologiques des pâtes de ciment selon la méthode de Bingham Papanastasiou

Concernant le paramètre  $m$ , ce paramètre montre une diminution avec l'augmentation du rapport E/C. Nous obtenons une valeur  $m$  de 38.95 pour une pâte P030 et de 0.04 pour la pâte P060 (Tableau IV.5).

Nous avons observé que l'augmentation de la concentration de solides, entraîne une diminution du rapport E/C. Cette diminution se traduit par la diminution de la distance entre particules de ciment dans la suspension, tout en générant une augmentation de la force dispersive comme le montre la Figure IV.4. A partir de cette observation,  $m$  peut décrire l'équilibre des interactions physiques entre l'eau et les particules anhydres lesquelles peuvent être liées à la distance entre particules solides. Donc, plus les particules solides sont éloignées les unes des autres, moins il y a d'interactions entre particules. Donc, avec la diminution de particules solides dans un fluide tel que la pâte, les particules sont très éloignées et leurs interactions diminuent comme c'est le cas avec le paramètre  $m$  de Bingham-Papanastasiou.

Ces interactions ne changent pas durant la période dormante de la pâte de ciment avant le début de la prise. Donc,  $m$  peut être le paramètre représentant la mesure de cette force qui empêche les particules de s'écouler. Plus la valeur de  $m$  est grande, plus la force de dispersion entre particules solides est grande et donc du seuil d'écoulement aussi (Figure IV.16).

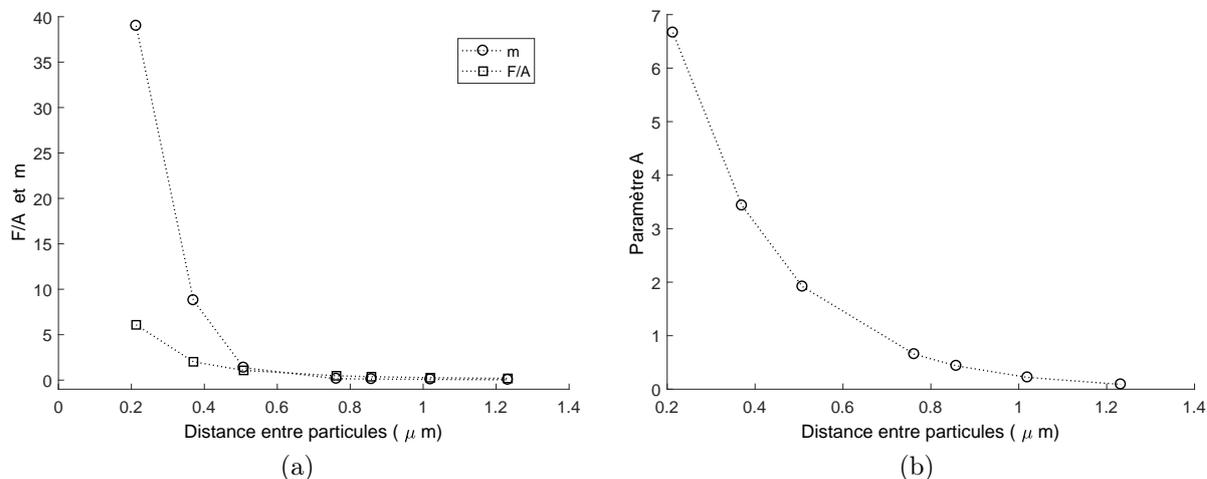


FIGURE IV.16 – (a) Force de dispersion ( $F/A$ ) et la valeur de " $m$ ", et (b) valeur de paramètre  $A$  en fonction de la distance entre particules

Pour déterminer la force de dispersion totale  $F$ , il faut déduire le paramètre  $A_{(\lambda)}$ . Comme le paramètre  $A_{(\lambda)}$  varie exponentiellement en fonction de la distance entre les particules, plus les particules sont proches, plus le paramètre est grand :

$$A(\lambda) = 16.403 * \exp(-4.227\lambda) \quad (IV.16)$$

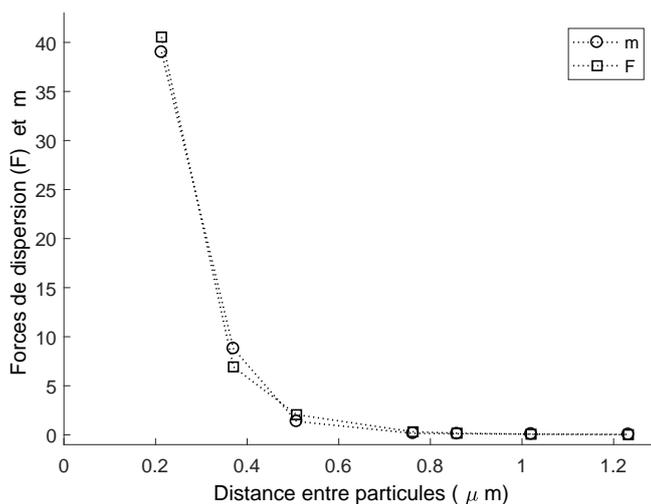


FIGURE IV.17 – Force de dispersion ( $F$ ) et la valeur de " $m$ " en fonction de la distance entre particules

A partir de ces réflexions, nous pouvons dire, que le paramètre  $m$  semble décrire la combinaison de ces deux phénomènes, la concentration de solides et l'intensité des interactions attractives et repulsives entre particules dans l'eau.

## IV.2 Mortier

### IV.2.1 Composition et préparations des mortiers

Les échantillons sont préparés au laboratoire (climatisé avec une température moyenne de 25 °C et une humidité relative de 50%) à l'aide d'un malaxeur planétaire dont le volume est de 5 litres. Le ciment et l'eau sont versés dans le bol. On démarre le malaxeur à basse vitesse pendant 60 secondes et on incorpore le sable après 30 secondes pendant le malaxage. Ensuite, le malaxeur est arrêté pendant 90 secondes. Pendant ce temps, la paroi latérale du bol est raclee avec un truelle de tout mortier adhérent aux parois et placé au milieu du bol. Ensuite, le mélange reprend pendant 60 secondes à haute vitesse. Nous utilisons du ciment CEM I pour tous les échantillons. La composition des mélanges sont décrits dans le Tableau IV.6.

| Matériaux          | M040 | M045  | M050 | M055  | M060 |
|--------------------|------|-------|------|-------|------|
| Sable( <i>g</i> )  | 1350 | 1350  | 1350 | 1350  | 1350 |
| Ciment( <i>g</i> ) | 450  | 450   | 450  | 450   | 450  |
| Eau( <i>g</i> )    | 180  | 202.5 | 225  | 247.5 | 270  |

TABLE IV.6 – Composition des mortiers

### IV.2.2 Masse volumique des mortiers frais

La masse volumique des mortiers est déterminée en suivant la norme NF EN 1015-6. La masse volumique des mortiers est déterminée par le quotient de sa masse par le volume qu'il occupe lorsqu'il est introduit et compacté dans un récipient de mesurage d'une capacité donnée. Les résultats sont affichés dans le Tableau IV.7 et la Figure IV.18. La masse volumique est calculée à partir de l'Équation IV.1. Pour ce procédé, nous avons préparé 3 échantillons pour chaque rapport E/C des mortiers (M040, M050 et M060).

| Matériaux                                  | M040 | M050 | M060 |
|--|------|------|------|
| Masse volumique( <i>Kg/m<sup>3</sup></i> ) | 2238 | 2193 | 2152 |

TABLE IV.7 – Masse volumique des mortiers

A partir de la Figure IV.18, nous pouvons voir la diminution des masses volumiques des pâtes et des mortiers avec l'augmentation du rapport E/C. Les écarts types très importants dans les mesures peuvent être dû aux erreurs de manipulation.

### IV.2.3 Essais rhéologiques

#### a. Équipement

Pour étudier la rhéologie des mortiers, nous utilisons le rhéomètre à rotation "RheoCAD 500" (Figure IV.19) au laboratoire de CERIB à Épernon, pour dessiner les courbes de contraintes ( $\tau$ ) en fonction du taux de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) qui nous permettent ensuite de déterminer le seuil de cisaillement ( $\tau_0$ ). Parmi les géométries mobiles du rhéomètre, la géométrie à ailettes à 4 lames est utilisée (géométrie vane). Les dimensions de la cellule de mesure sont

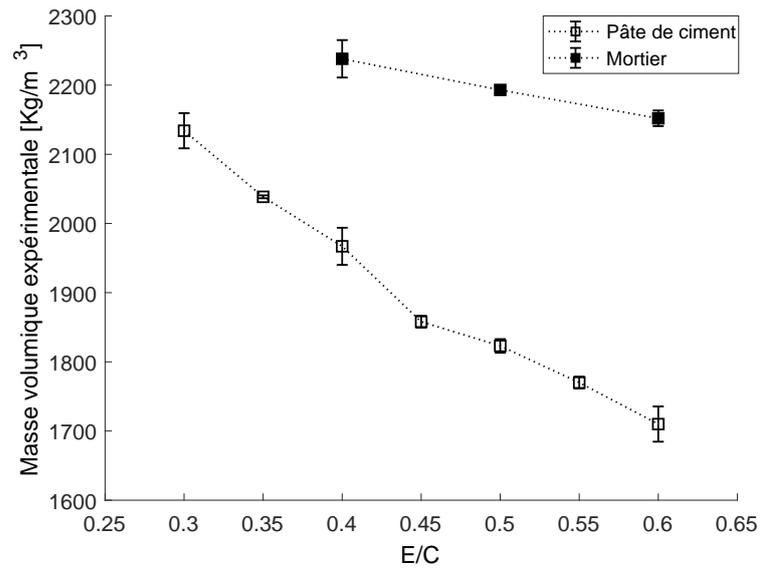


FIGURE IV.18 – Variation de la masse volumique expérimentale des pâtes de ciment et des mortiers

de 32 cm de diamètre et 35 cm de hauteur avec un volume de 30 litres environ. La géométrie mobile à palettes de 12 cm de diamètre a été utilisée.



(a)



(b)

FIGURE IV.19 – Présentation de l'équipement : (a) Rhéomètre RheoCAD 500 chez Cerib-Épernon (b) Geometrie Vane

## b. Protocole des essais

Les mesures rhéologiques sont effectuées durant la période d'induction où le taux d'hydratation est quasi nul. Le délai entre la préparation de mortier et l'essai de rhéologie est inférieur à 30 minutes. L'échantillon est placé dans la cellule de mesure et les essais se déroulent selon un protocole de mesure choisie (Figure IV.20) à contrainte imposée. Ce procédé est appliqué sur des échantillons de mortiers de différents rapports E/C (M045, M050, M055 et M060). Le protocole d'essai n'est pas le même que dans le cas de la pâte, en particulier en ce qui concerne le pré-cisaillement. Après le pré-cisaillement nous avons observé que le mélange s'est considérablement sédimenté, et que les résultats étaient très différents, et présentaient des valeurs largement dispersées entre les mortiers. Nous avons alors décidé de supprimer cette étape de pré-cisaillement et de passer directement à l'étape de soumission du mélange à une contrainte croissante.

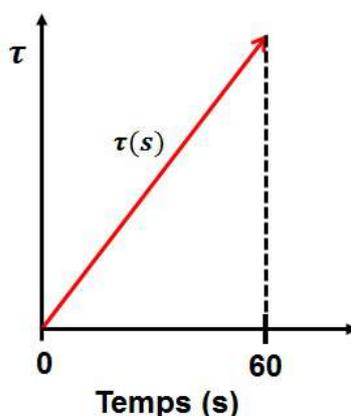


FIGURE IV.20 – Protocole d'essai utilisé pour les mortiers

### IV.2.4 Variation de la rhéologie des mortiers en fonction du rapport E/C

L'écoulement des mortiers commence à partir d'une contrainte  $\tau_0$ . Ainsi, à partir de la Figure IV.21, nous pouvons voir que la courbe d'écoulement des mortiers est divisée en deux zones d'écoulement (taux de cisaillement inférieur à  $1 \text{ s}^{-1}$ ). Dans la zone I inférieure à environ 150 Pa lorsque l'essai rhéologique commence, le fluide reste immobile. Cette première zone peut être désignée comme une zone de non-écoulement. La zone de non-écoulement regroupe le domaine qui est inférieur au seuil de cisaillement et peut faire partie de la zone d'écoulement à faible taux de cisaillement non détectable par le rhéomètre. La zone II supérieure à 150 Pa, le fluide commence à s'écouler et la contrainte d'écoulement du fluide augmente en même temps que le taux de cisaillement.

Les résultats des essais sont présentés dans la Figure IV.22. En effet, le comportement rhéologique des mortiers est variable en fonction du rapport E/C. Le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. Après avoir mesuré son comportement rhéologique dans le rhéomètre, nous prenons 2 courbes d'écoulement de chaque rapport E/C pour déterminer leurs paramètres rhéologiques en utilisant la méthode d'ajustement par Gauss-Newton, selon les modèles classiques et modifiés.

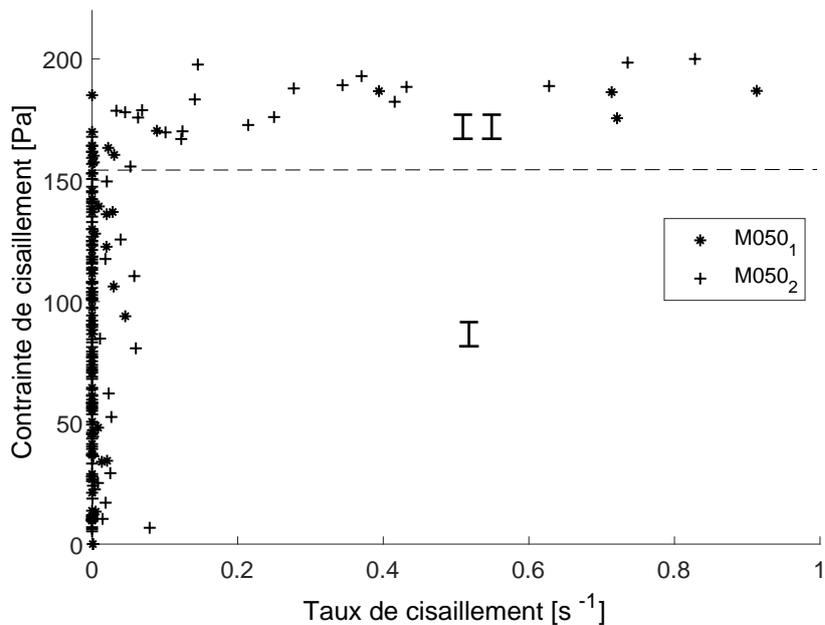


FIGURE IV.21 – Courbe d’écoulement des 2 mortiers de type M050 et les zones d’écoulement

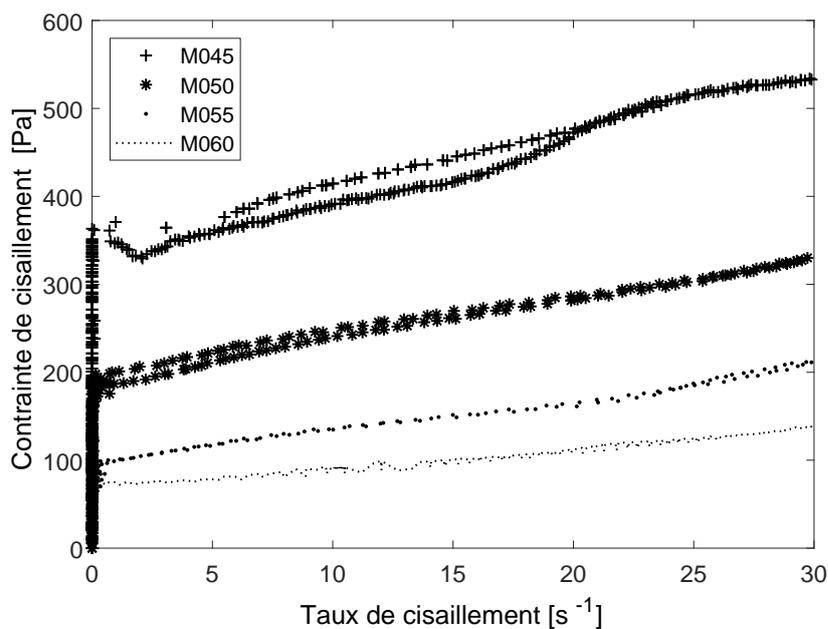


FIGURE IV.22 – Différentes courbes rhéologiques des mortiers M045, M050, M055 et M060

### a. Modèles classiques

Le comportement rhéologique de mortiers comme de pâtes de ciment peut être déterminé à partir des modèles classiques dont les données expérimentales sont prises en compte à partir de la zone II (point d’écoulement (Figure IV.21)). Nous rappelons les modèles classiques utilisés :

#### *Bingham*

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (\text{IV.17})$$

*Casson*

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad (\text{IV.18})$$

*Herschel Bulkley*

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{IV.19})$$

A partir de l'ajustement numérique, nous avons assemblé les paramètres obtenus dans un tableau récapitulatif de tous les paramètres rhéologiques de nos mortiers selon chaque modèle classique utilisé (Tableau IV.8).

| Échantillon | M045     |       |      |       | M050     |       |      |       |
|-------------|----------|-------|------|-------|----------|-------|------|-------|
| Modèle      | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | $R^2$ |
| Bingham     | 326      | 7.23  | -    | 0.97  | 193      | 4.58  | -    | 0.98  |
| Casson      | 258      | 1.70  | -    | 0.89  | 158      | 0.96  | -    | 0.97  |
| Herschel B  | 337      | -     | 3.84 | 0.97  | 185      | -     | 8.70 | 0.99  |
| Échantillon | M055     |       |      |       | M060     |       |      |       |
| Modèle      | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | $R^2$ |
| Bingham     | 97       | 3.61  | -    | 0.99  | 68       | 2.21  | -    | 0.98  |
| Casson      | 71       | 1.09  | -    | 0.96  | 46       | 1.09  | -    | 0.91  |
| Herschel B  | 97       | -     | 3.61 | 0.99  | 73       | -     | 1.08 | 0.98  |

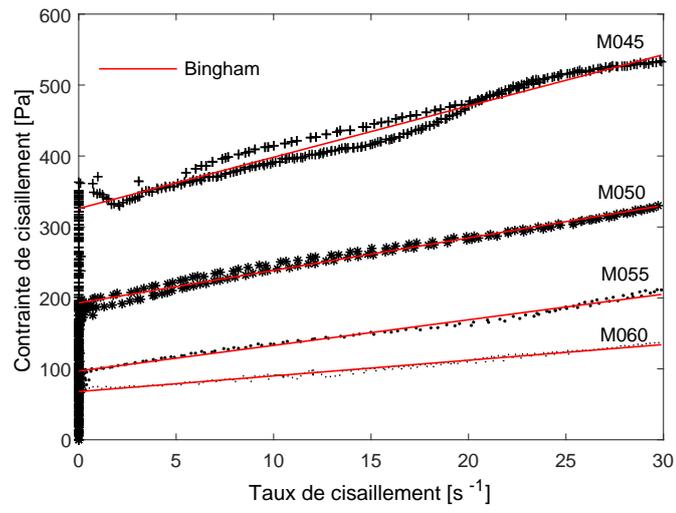
TABLE IV.8 – Propriétés rhéologiques des mortiers selon les modèles classiques

A partir des données de ce tableau, sont dessinées les courbes d'écoulement de contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour chaque modèle classique (Figure IV.23).

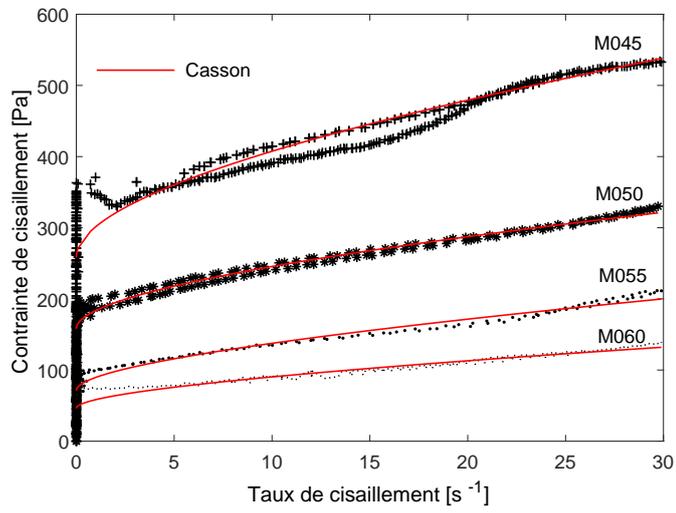
A partir de la Figure IV.23, nous pouvons observer la diminution du seuil de cisaillement lorsque le rapport E/C augmente quelque soit les modèles. De la même façon, nous pouvons observer la diminution de la pente (viscosité) avec l'augmentation de rapport E/C.

D'après nos résultats d'ajustement non linéaire (Tableau IV.8), nous pouvons déterminer les modèles les plus adaptés pour décrire le comportement des mortiers. Le modèle Bingham avec  $R^2$  supérieur à 0.97 est adapté pour tous les mortiers quelques soient le rapport E/C. Le modèle Casson avec  $R^2$  supérieur à 0.89 est le moins adapté pour mesurer le comportement des mortiers et le modèle Herschel Bulkley avec  $R^2$  supérieur à 0.97 est adapté pour décrire les mortiers. Finalement, nous pouvons dire, que les modèles de Bingham et Herschel Bulkley sont les plus adaptés pour décrire le comportement des mortiers. D'après les paramètres rhéologiques obtenus par l'ajustement non linéaire à partir de nos données expérimentales, nous déterminons la variation des propriétés rhéologiques des mortiers en fonction du rapport E/C. Pour cela, nous traçons les variations du seuil et de la viscosité selon chaque modèle utilisé.

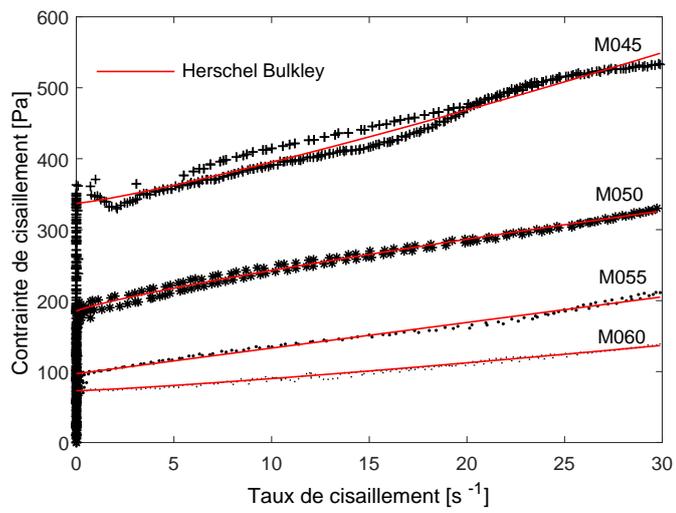
A partir de la Figure IV.24, nous observons que le seuil de cisaillement diminue avec l'augmentation du rapport E/C, quelque soit le modèle classique utilisé. Quand le rapport E/C tend vers 0, le seuil tend vers l'infini. La viscosité diminue selon le modèle Bingham. Selon le modèle Casson la viscosité a tendance à diminuer avec l'augmentation du rapport E/C.



(a)



(b)



(c)

FIGURE IV.23 – Comportement rhéologique des mortiers déterminés à partir des lois classiques : (a) Bingham, (b) Casson et (c) Herschel Bulkley

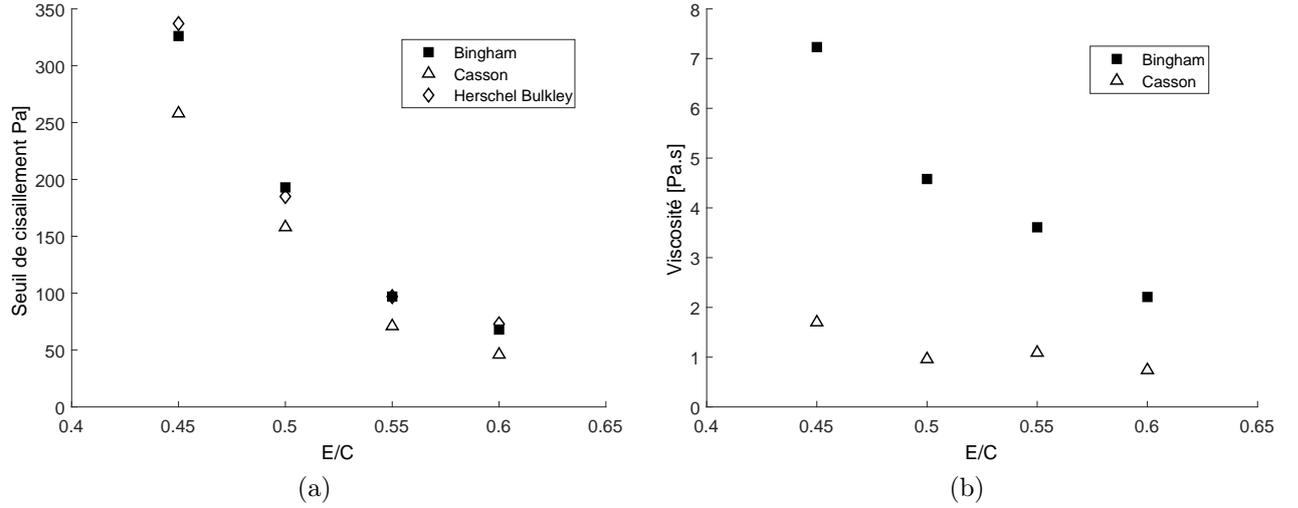


FIGURE IV.24 – Variation selon le rapport  $E/C$  : (a) du seuil de cisaillement et (b) de la viscosité

## b. Modèles modifiés

De la même façon que pour les pâtes, le comportement rhéologique des mortiers peut être déterminé par ajustement en utilisant les modèles modifiés par Papanastasiou. Pour cet ajustement toutes les données expérimentales sont prises en compte et les propriétés rhéologiques des mortiers pour chaque modèle sont répertoriés dans le (Tableau IV.9). Nous rappelons les modèles mathématiques modifiés utilisés.

### *Bingham-Papanastasiou*

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 - \exp(-m\dot{\gamma}) \right] + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{IV.20})$$

### *Casson-Papanastasiou*

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} \left[ 1 - \exp(-\sqrt{m\dot{\gamma}}) \right] + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad (\text{IV.21})$$

### *Herschel Bulkley-Papanastasiou*

$$\tau = \tau_0 \left[ 1 - \exp(-m\dot{\gamma}) \right] + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{IV.22})$$

A partir du tableau récapitulatif de paramètres obtenus par ajustement non linéaire, les contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement selon chaque modèle mathématique modifié sont tracés (Figure IV.25).

De nos résultats, nous déterminons les modèles modifiés pour décrire le comportement des mortiers. Quelque soit le modèle, lorsque le rapport  $E/C$  reste faible (0.40 et 0.45) les valeurs de  $R^2$  (Tableau IV.9) sont très basses (0.32 et environ 0.54 respectivement). Ces valeurs peuvent être liées à des valeurs aberrantes dans nos données expérimentales (Figure IV.26). Selon la littérature, une valeur aberrante peut être considérée comme une observation qui

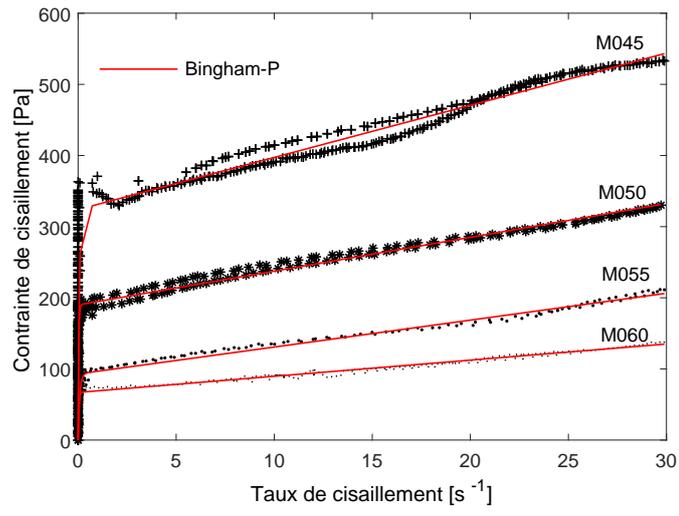
dévie tellement d'autres observations que l'on peut supposer quelle a été générée pour un autre mécanisme, ou qu'il s'agit d'une observation incompatible avec le reste du système (Ben-Gall, 2010). Les raisons de ces données aberrantes peuvent être diverses, telles que ; un défaut d'appareil de mesure, une erreur humaine, un échantillon contaminé, le protocole choisi, les difficultés de mesure etc. Une donnée peut sembler aberrante alors qu'elle peut aussi révéler la mauvaise adéquation du modèle statistique utilisé pour interpréter les données. Dans notre cas, ces données aberrantes dans le mortier M045 correspondent aux premières contraintes à fournir afin de déclencher l'écoulement d'une suspension initialement structurée (suspension vierge sans pré-cisaillement). Le seuil obtenu est appelé seuil statique où la contrainte d'écoulement diminue un peu pour ensuite augmenter linéairement. Dans le cas du mortier M050, nous observons moins de points aberrants lorsque l'écoulement commence. Mais en même temps, les données sont un peu éloignées les unes des autres, ce qui génère un grand écart-type. Ces valeurs peuvent également être considérées comme des caractéristiques de l'effet thixotropique de la limite d'écoulement des mortiers. cet effet est beaucoup plus important dans les mortiers visqueux (M045 et M050) que dans les mortiers fluides (M055 et M060). Donc, la limite d'écoulement des mortiers peut être dû deux types de phénomènes :

- des phénomènes thixotropiques d'origines structurelles, qui nécessitent une grande quantité de force pour détruire les structures formées durant le repos du mortier (lequel va se restructurer jusqu'à avoir l'aspect d'un solide (viscosité infini)), jusqu'à obtenir un état liquide (viscosité faible).
- des phénomènes dus aux forces de friction lorsque l'on considère les mortier comme une suspension granulaire. Selon la littérature, une suspension peut être considérée comme granulaire si la fraction volumique varie entre 0,56 et 0,64. Dans notre cas, le mortier M040 par exemple a une fraction volumique théorique de 0,55. Nous pouvons alors considérer tous nos mélanges comme des suspensions granulaires. La force nécessaire pour faire écouler une système granulaire est alors liée aux forces de friction entre les grains de sable. Si les sables sont plus compacts (distance courte entre particules, et rapport E/C faible), la force nécessaire sera très grande pour casser la structure, et inversement, jusqu'à arriver à une situation d'équilibre. A partir de la cassure, l'écoulement se poursuit normalement à mesure que l'on augmente la contrainte. Cette analyse nous permet de faire ressortir deux seuils d'écoulement, le premier lié à une contrainte maximum et le second lié à une contrainte d'équilibre (Barnes and Nguyen, 2001).

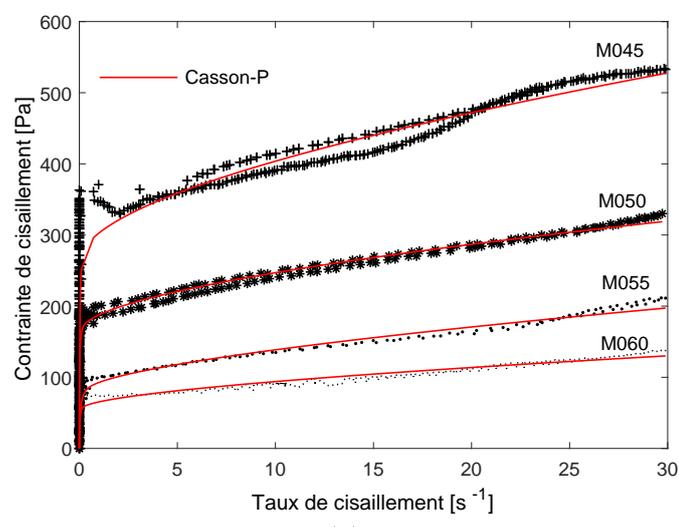
D'après nos résultats, il semble que les modèles de Bingham-Papanastasiou et Herschel Bulkley-Papanastasiou soient plus adaptés pour décrire le comportement des mortiers par

| Échantillon  | M045     |       |      |       |       | M050     |       |       |        |       |
|--------------|----------|-------|------|-------|-------|----------|-------|-------|--------|-------|
| Modèle       | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | m     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | m      | $R^2$ |
| Bingham - P  | 324      | 7.33  | -    | 15.69 | 0.32  | 190      | 4.75  | -     | 32.34  | 0.54  |
| Casson - P   | 261      | 1.55  | -    | 93.53 | 0.32  | 163      | 0.87  | -     | 117.74 | 0.55  |
| Herschel B-P | 334      | -     | 4.42 | 14.8  | 0.32  | 173      | -     | 14.63 | 38.83  | 0.54  |
| Échantillon  | M055     |       |      |       |       | M060     |       |       |        |       |
| Modèle       | $\tau_0$ | $\mu$ | K    | m     | $R^2$ | $\tau_0$ | $\mu$ | K     | m      | $R^2$ |
| Bingham - P  | 93       | 3.78  | -    | 12.23 | 0.94  | 67       | 2.27  | -     | 25.02  | 0.94  |
| Casson - P   | 75       | 0.97  | -    | 41.75 | 0.94  | 54       | 0.55  | -     | 111.92 | 0.94  |
| Herschel B-P | 85       | -     | 8.27 | 14.53 | 0.94  | 68       | -     | 2.07  | 24.56  | 0.94  |

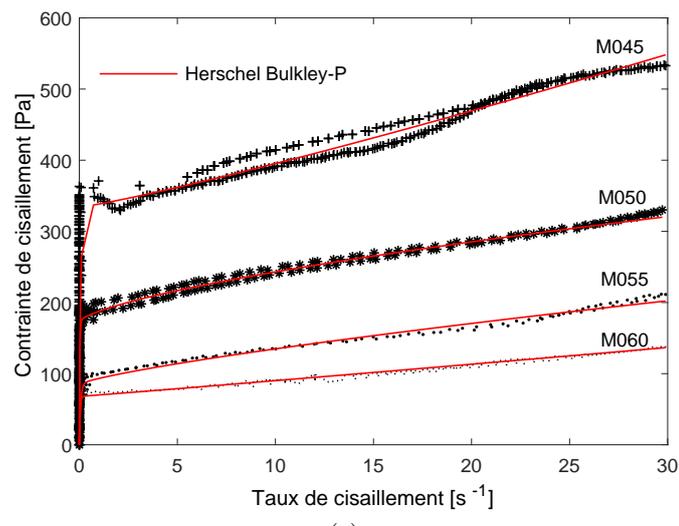
TABLE IV.9 – Propriétés rhéologiques des mortiers en fonction des modèles modifiés



(a)



(b)



(c)

FIGURE IV.25 – Comportement rhéologique des mortiers déterminés à partir des lois des modèles de Papanastasiou : a) Bingham Papanastasiou, b) Casson Papanastasiou et c) Herschel Bulkley Papanastasiou

rapport au modèle de Casson-Papanastasiou. Mais ceci reste vrai que pour les mortiers M055 et M060.

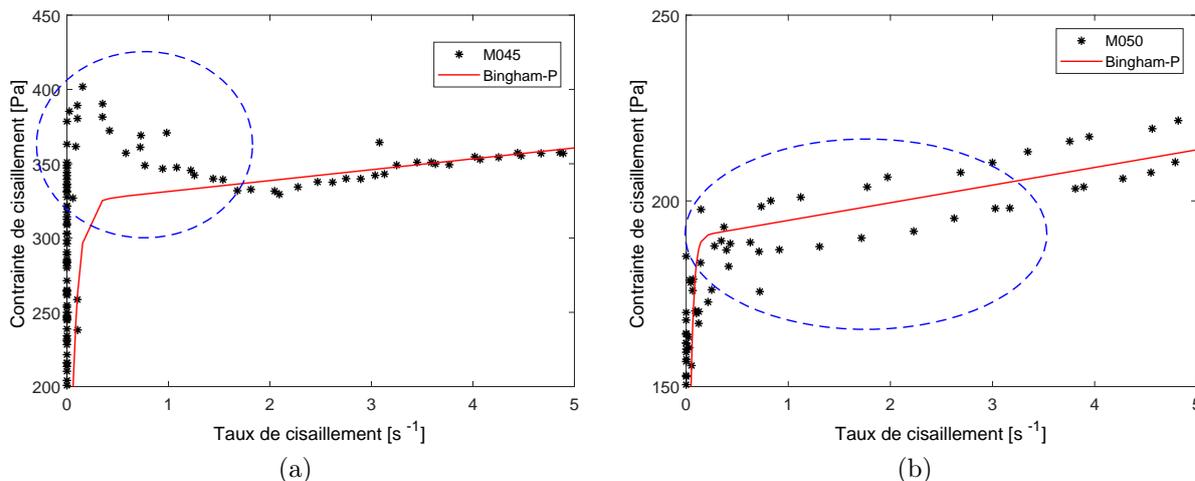


FIGURE IV.26 – (a) Données aberrantes pour le mortier M045 et (b) les écarts types obtenues dans le M050

D’après les paramètres obtenus par ajustement non linéaire à partir de nos données expérimentales pour chaque modèle modifié, nous avons préparé et dessinés pouvons observer la variation de seuil de cisaillement, de la viscosité et du  $m$  en fonction du rapport  $E/C$ .

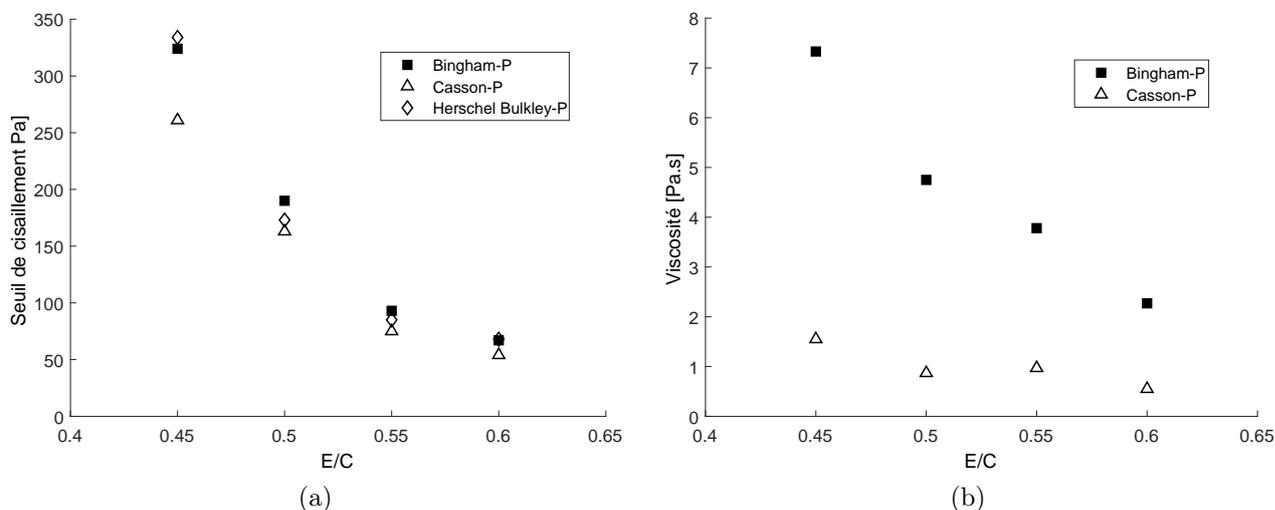


FIGURE IV.27 – Variation selon le rapport  $E/C$  : (a) du seuil de cisaillement et (b) de la viscosité à partir des modèles modifiés

D’après la Figure IV.27, nous retenons que le seuil de cisaillement diminue avec l’augmentation du rapport  $E/C$  quelques soient les modèles modifiés utilisés. De la même façon que dans les modèles classiques, si le rapport  $E/C$  tend vers 0, le seuil tend vers l’infini. D’autre part, la viscosité diminue avec l’augmentation du rapport  $E/C$  selon le modèle Bingham-Papanastasiou. Selon le modèle Casson, la viscosité a tendance à diminuer avec l’augmentation du rapport  $E/C$ .

Concernant le paramètre  $m$ , nous pouvons également l’analyser en fonction du rapport  $E/C$ . D’après la Figure IV.28, le paramètre  $m$  est très dispersé. Quelques soient les modèles

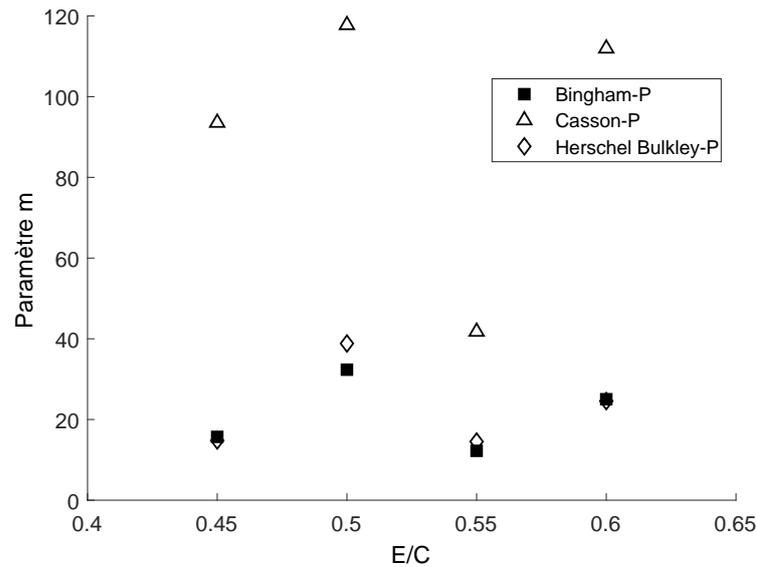


FIGURE IV.28 – Variation du paramètre  $m$  en fonction du rapport  $E/C$  selon les différents modèles modifiés

utilisés, nous ne trouvons pas une tendance bien définie entre le paramètre  $m$  et la variation du rapport  $E/C$ . Autre remarque à faire, les valeurs de  $m$  sont très grandes (supérieur à 10) par rapport à les pâtes.

### *Analyse générale des résultats*

A partir de nos résultats expérimentaux, nous avons déterminé la variation des propriétés rhéologiques des mortiers en fonction du rapport  $E/C$  selon différents modèles mathématiques. Nous avons la variation du seuil, de la viscosité et du paramètre  $m$  selon chaque modèle utilisé. Finalement, à partir des coefficients de détermination, nous avons déterminé les modèles les plus adaptés pour décrire le comportement des mortiers.

Selon nos résultats, nous avons vu que le seuil diminue avec l'augmentation du rapport  $E/C$ , quelque soit le modèle utilisé. La viscosité diminue selon le modèle Bingham et Bingham Papanastasiou. Selon les modèles Casson et Casson Papanastasiou, la viscosité a une légère tendance à diminuer avec l'augmentation du rapport  $E/C$ , mais avec une valeur différente pour le mortier M050. Les viscosités selon Casson et Casson Papanastasiou sont très petites par rapport aux modèles Bingham et Bingham Papanastasiou. D'autre part le paramètre  $m$  ne présente aucun sens avec l'augmentation du rapport  $E/C$ . A partir des coefficients de détermination  $R^2$ , nous avons pu déterminer le modèle le plus adapté pour décrire le comportement rhéologique des mortiers frais. Les modèles les plus adaptés pour décrire le comportement des mortiers sont Bingham et Herschel Bulkley selon les modèles classiques, et Bingham-Papanastasiou et Herschel Bulkley-Papanastasiou selon les modèles modifiés. Parmi tous ces modèles adaptés, les paramètres obtenus par la méthode de Bingham et Bingham-Papanastasiou ont une tendance bien définie et des valeurs de seuil et viscosité très similaires. Donc, nous considérons que ces résultats semblent cohérents.

| Modèle    | Bingham  |       | Bingham Papanastasiou |       |      |
|-----------|----------|-------|-----------------------|-------|------|
| Matériaux | $\tau_0$ | $\mu$ | $\tau_0$              | $\mu$ | $m$  |
| M045      | 326      | 7.23  | 324                   | 7.33  | 15.7 |
| M050      | 193      | 4.58  | 190                   | 4.75  | 32.3 |
| M055      | 97       | 3.61  | 93                    | 3.78  | 12.2 |
| M060      | 68       | 2.21  | 67                    | 2.27  | 25.1 |

TABLE IV.10 – Paramètres rhéologiques du mortier selon la méthode de Bingham et Bingham-Papanastasiou

A partir de Tableau IV.10, nous observons qu'il n'existe pas de relation claire entre paramètre  $m$  et rapport E/C. Cette incohérence peut être due à la présence de sable. Premièrement la présence du sable fait que le fluide est hétérogène (contrairement à la pâte de ciment qui peut être considérée comme un fluide homogène) donc, la mesure du  $m$  peut varier selon l'hétérogénéité du fluide. Deuxièmement, les interactions physiques, peuvent être coupées par la présence du sable.

### IV.3 Conclusions

Le but de ce chapitre a été de trouver la relation entre les propriétés rhéologiques et le rapport E/C de matériaux cimentaires. Pour ensuite, trouver une relation entre les propriétés rhéologiques à l'état frais et les aspects de surface à l'état durcie. Pour cela, nous avons préparé à l'IRC ESTP des mélanges de pâtes de ciment et au laboratoire du CERIB pour les mélanges des mortiers afin de déterminer leur courbes d'écoulement.

A partir de nos observations expérimentales, nous pouvons noter les observations suivantes :

1. La masse volumique des pâtes et des mortiers diminue avec l'augmentation du rapport E/C.
2. Le seuil de cisaillement et la viscosité des pâtes de ciment et de mortiers diminuent avec l'augmentation du rapport E/C quelque soit la méthode utilisée.

Nous avons étudié plusieurs modèles mathématiques pour décrire le comportement rhéologiques des matériaux cimentaires. Ainsi d'une manière générale, selon la méthode numérique de la régression non linéaire, tous les modèles indiqués dans notre travail sont adaptés pour décrire l'écoulement des pâtes de ciment et des mortier. Pour plus de précision, les modèles mathématiques les plus adaptés pour décrire le comportement des pâtes sont les modèles Herschel Bulkley et les modèles modifiés par Papanastasiou. Pour les mortiers les modèles les plus adaptés sont Bingham, Herschel Bulkley et leurs lois modifiées. En revanche, les lois rhéologiques modifiées n'arrivent pas bien décrire le comportement des mortiers lorsque les rapport de E/C sont faibles. Cela du à les données aberrantes obtenues en relation aux modèles utilisés.

Concernant le paramètre  $m$  proposé par la méthode de Bingham Papanastasiou dans les pâtes de ciment. Ce paramètre pourrait décrire l'équilibre des interactions attractives et répulsives entre l'eau et les particules anhydres. Nous avons vu dans la littérature que le seuil peut être déterminé par la rupture des ponts d'hydrates entre particules (CSH principalement) et les forces d'attraction colloïdale. Cependant, les ponts des CSH peut être "éliminés"

par le malaxage. Donc, la seule force prépondérante qui pourrait déterminer le seuil pourrait être la force colloïdale.

D'après nos observations, la force colloïdale des pâtes augmente quand le rapport  $E/C$  diminue, cela est dû à la diminution de la distance entre particules. De la même façon, la valeur du paramètre  $m$  augmente avec la diminution du rapport  $E/C$ . Donc, le paramètre  $m$  pourrait décrire la force colloïdale dans les pâtes de ciment.

Finalement, à partir de ces observations sur la variation des propriétés rhéologiques en fonction du rapport  $E/C$  à l'état frais dans les matériaux cimentaires (pâte et mortier), nous pouvons faire un lien avec leur état durci. Nous avons observé qu'un matériau très fluide avec un seuil et viscosité très faible (rapport  $E/C$  faible) va nous permettre d'obtenir une surface bien lisse et claire une fois durcie. Donc, à partir des propriétés rhéologiques nous pouvons prédire l'état de surfaces des matériaux cimentaires.

Enfin, étant donné le sens physique de tous les paramètres obtenus par la méthode de Bingham Papanastasiou (seuil, viscosité et  $m$ ) pour décrire le comportement des pâtes de ciment, nous allons utiliser ce modèle pour la simulation numérique dans le chapitre suivant. La simulation numérique a pour but de déterminer le temps et la forme de remplissage des pâtes dans un moule donné. Ces paramètres seront liés avec les résultats obtenus dans le chapitre III sur la variation de la teinte et de la rugosité en fonction de la variation du rapport  $E/C$  dans ce chapitre.



Troisième partie

Simulation numérique

# Table des matières

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>V Simulation numérique</b>   | <b>107</b> |
| V.1 Introduction . . . . .  | 107        |
| V.2 Simulation d'écoulement des pâtes de ciment en 2D . . . . .               | 109        |
| V.2.1 Introduction . . . . .  | 109        |
| V.2.2 Résultats numériques . . . . .  | 112        |
| V.2.3 Observations visuelles de la variation de la teinte des pâtes de ciment | 119        |
| V.3 Mise en place d'un mur en pâte de ciment . . . . .                        | 120        |
| V.3.1 Introduction . . . . .  | 120        |
| V.3.2 Observations . . . . .  | 121        |
| V.4 Conclusions . . . . .   | 123        |
| <b>VI Conclusions générales et perspectives</b>                               | <b>125</b> |

---

# CHAPITRE V

## Simulation numérique

Dans ce chapitre, nous parlerons de l'importance de la simulation numérique dans la technologie du béton. nous parlerons aussi des principaux groupes de simulation, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Dans notre cas, nous étudierons le temps de remplissage des pâtes de ciment dans un moule donné. Cette étude sera réalisée en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics dans lequel nous allons implémenter la loi de Bingham Papanastasiou issue des résultats expérimentaux et des observations dans le chapitre précédent. Le but de la simulation est de déterminer l'influence de la variation du rapport E/C sur le temps de remplissage et le profil d'écoulement des pâtes dans un moule donné. Dans ce cas, nous allons effectuer la simulation de 3 pâtes de ciment (P040, P050 et P060). Une fois la simulation effectuée, ces résultats seront comparés à des essais expérimentaux utilisant la même taille de moule que celle utilisée pour la simulation. De cette façon, nous pourrions valider nos résultats expérimentaux obtenus par la régression numérique appliquée à la loi de Bingham Papanastasiou au travers de la simulation. La simulation et l'expérimentation seront réalisées à l'aide d'un moule rectangulaire de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . La simulation numérique sera faite en 2D dans notre étude. Nous allons finir cette partie, par la simulation d'un mur en pâte de ciment afin d'observer le temps de remplissage, la formation et la montée de bulles d'air.

### V.1 Introduction

La modélisation numérique de l'écoulement de béton frais est un outil puissant et pratique pour comprendre son comportement rhéologique. Pour les bétons, la simulation numérique avec une large gamme de tailles de particules est assez complexe (Rossel and Gram, 2014) (Shyshko, 2013). Dans la littérature, il existe différentes manières de classer les techniques de modélisation numérique du béton. Ainsi pour Zhuguo (Zhuguo, 2007), la modélisation du béton frais peut être classée en deux types : modèle de corps continu et modèle de corps discontinu pour la non-homogénéité du béton frais. Selon Vasilic (Vasilic, 2014), la base de toutes les méthodes de modélisation du béton est de savoir si elles sont basées sur la dynamique des fluides (le béton est supposé être un fluide) ou sur la mécanique des solides (le béton est supposé être une collection de particules solides uniques). La Figure V.1 présente la classification et la représentation schématique des méthodes de fluide et de particules.

Les techniques de modélisation computationnelle que l'on peut trouver dans la littérature peuvent être divisées aussi en trois grandes familles (Rossel et al., 2007) : Simulation de fluide unique(homogénéisé), simulation d'éléments discrets et simulation des particules en

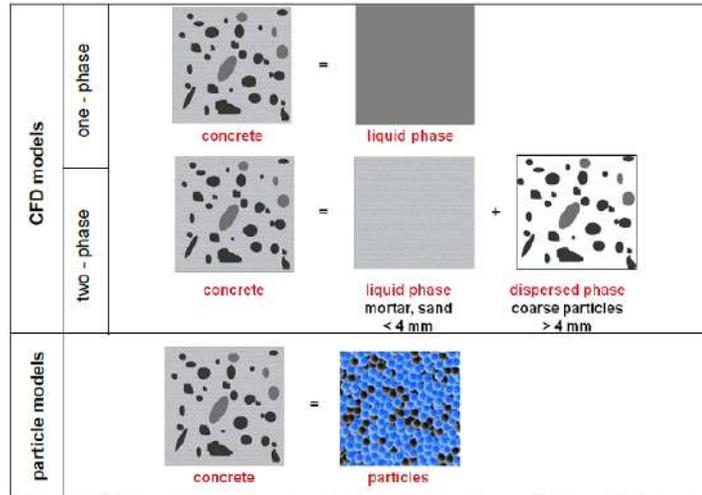


FIGURE V.1 – Classification du modèle : modèle CFD (ci-dessus) et modèle de particules (ci-dessous) [Vasilic \(2014\)](#)

suspension dans un fluide.

### a. *Simulation de fluide unique (homogène)*

La simulation de fluide unique consiste à considérer le béton comme un fluide homogène unique et non hétérogène. Ce type de simulation est le plus utilisé pour modéliser l'écoulement du béton frais. Ce type de simulation suppose que le béton frais est un fluide simple et homogène. Les propriétés rhéologiques sont données et obtenues généralement en utilisant la loi de Bingham. Il existe plusieurs méthodes que nous pouvons utiliser pour simuler le béton comme de simples fluides. Par exemple : La méthode d'élément finis viscoplastique ("Viscoplastic Finite Element Method"-VFEM) et la méthode d'élément divisé viscoplastique ("Viscoplastic Divided Element Method"-VDEM) pour des simulations d'essais et de remplissage de béton frais ([Mori and Tanigawa, 1992](#)) et l'écoulement du béton autoplaçant en utilisant l'essai de la boîte L et d'affaissement ([Thrane et al., 2004](#)). La simulation de fluide unique a de point forts tels que la rapidité de simuler l'écoulement du béton et le large choix de lois de comportement qui nous permettent de modéliser de nombreux phénomènes rhéologiques. Les points faibles peuvent être le blocage et la ségrégation des particules qui ne peuvent pas être modélisées.

### b. *Simulation de particules discrètes*

La simulation d'écoulement de particules discrètes a été étudiée pour la modélisation numérique de mouvement et d'interaction des agrégats dans le béton. Le flux de béton est lié aux flux granulaires. Parmi les méthodes décrites nous avons la méthode d'élément discret standard (DEM) utilisée. Par exemple, le comportement rhéologique du flux de béton frais dans différents essais (Boîte L ou d'affaissement)([Shyshko, 2013](#)) a été modélisé par la méthode de DEM. Une autre méthode appelée "Dynamiques de Particules Dissipatives" (DPD) présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de calcul dynamique. Cette méthode DPD contient la Dynamique Moléculaire (DM) et les interactions inter-particules. Les points forts de la simulation discrète sont que la surface libre mobile du matériau s'écoulant peut être modélisée en détail, et que les trajectoires des espèces sélec-

tionnées dans le mélange peuvent être étudiées. Les points faibles se retrouvent au niveau physique. D'une part il est difficile de définir ce qui devrait être en contact direct entre les particules solides représentant la phase de mortier et les particules solides représentant les grains les plus grossiers. D'autre part, les paramètres sont impossible à mesurer.

### c. Simulation de l'écoulement de la suspension

Dans ce type de simulations, le béton est modélisé comme une suspension de particules dans un fluide. Les méthodes décrites dans la littérature sont la méthode de l'élément de suspension viscoplastique VSEM (Viscoplastic suspension element method) et la méthode des éléments finis avec un point d'intégration lagrangien FEMLIP (Finite element method with lagrangian integration point). La méthode de VSEM représente un modèle de corps discontinu pour l'analyse du flux de béton. Tandisque la méthode FEMLIP est basée sur un maillage d'éléments finis Eulériens avec des particules Lagrangiennes portant des propriétés matérielles et des variables temporelles. Ces méthodes capturent la nature réelle du matériau. Le temps de calcul reste raisonnable. Toute loi rhéologique peut être utilisée pour la matrice fluide. Des modèles visqueux anisotropes peuvent être utilisés pour représenter un écoulement de béton renforcé par des fibres par exemple.

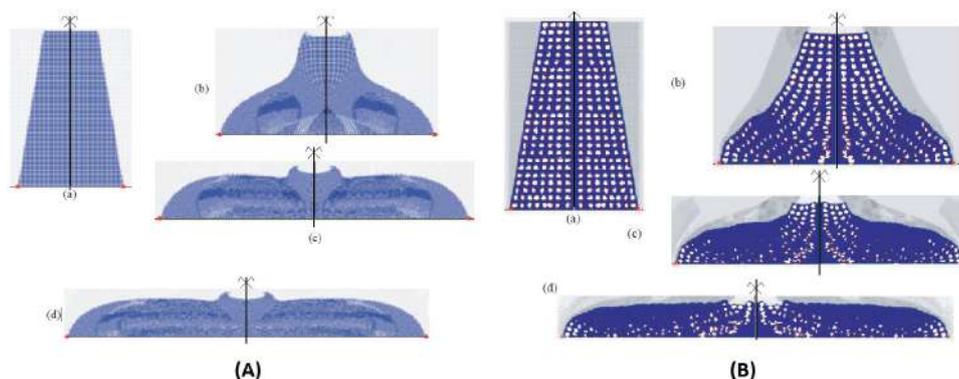


FIGURE V.2 – Simulation numérique d'essais d'écoulement d'affaissement par : A) approche homogène (fluide unique) et B) approche hétérogène (suspension) (Dufour, 2002)

## V.2 Simulation d'écoulement des pâtes de ciment en 2D

### V.2.1 Introduction

Dans cette partie, l'objectif principal de l'étude est de simuler le flux diphasique (air et fluide) en utilisant la méthode du "level-set". L'idée de la méthode "level-set" est de définir l'interface entre les deux fluides en utilisant une fonction implicite  $\phi$  (Kennedy, 2014). Nous allons utiliser le logiciel COMSOL Multiphysics avec le module CFD (Computational Fluid Dynamics) pour prédire le temps et la forme de remplissage des pâtes de ciment dans un moule dont la dimension est de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  (Figure V.3). Dans la réalité, la pâte de ciment frais est un fluide hétérogène composé des grains de ciment et d'eau. Pour faciliter la tâche nous allons considérer la pâte comme un fluide homogène. Nous avons introduit la loi d'écoulement non Newtonien de type Bingham-Papanastasiou sur COMSOL afin de simuler l'écoulement des pâtes de ciment.

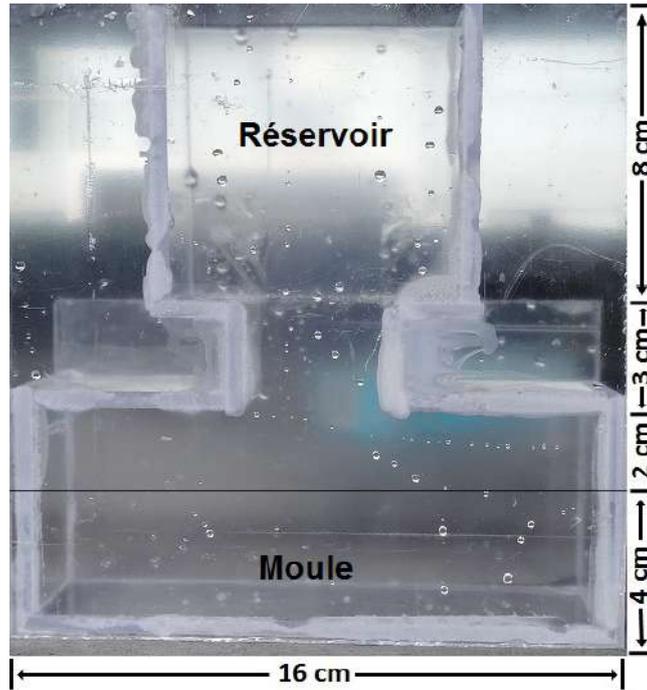


FIGURE V.3 – Moule en plexiglas de 16cm de largeur et 17cm de hauteur

Les interfaces monophasées sont basées sur les équations de Navier-Stokes, qui dans leur forme la plus générale sont :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (\text{V.1})$$

qui est l'équation de la conservation de la masse.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \tau] + F \quad (\text{V.2})$$

Où :

- $\rho$  est la densité ( $Kg/m^3$ )
- $u$  est le vecteur vitesse ( $m/s$ )
- $p$  est la pression ( $Pa$ )
- $\tau$  est le tenseur de contraintes visqueuses ( $Pa$ )
- $F$  est le vecteur de force volumique ( $N/m^3$ )

Le premier terme à gauche de l'Équation V.2 représente l'accélération d'une particule de fluide. Le second terme est la variation de la vitesse associée à l'exploration du champ de vitesse par la particule de fluide au cours de son mouvement. Le premier terme à droite représente les forces de pression correspondant aux contraintes normales et les forces de viscosité dues à la déformation des éléments de fluide. Le second terme regroupe l'ensemble des forces en volume appliqués au fluide.

Pour un fluide incompressible, c'est-à-dire tel que la masse volumique de chaque élément reste constante au cours du mouvement ( $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ).

On impose la condition initiale suivante (les fluides sont initialement au repos) :

$$\frac{du}{dt} \Big|_{t=0} = 0 \quad (\text{V.3})$$

et les condition aux limites suivantes : la frontière du domaine est une paroi mouillée dont la mouillabilité est spécifiée par un angle de contact caractéristique de la surface et du fluide. Dans notre cas, l'angle de contact est de  $90^\circ$ .

L'angle de contact est un angle situé entre la surface du solide et la goutte d'eau déposée sur un solide. Young-Dupré a compris que l'angle de contact d'une goutte est indépendant de la taille de cette goutte mais dépend des tensions présentes autour de celle-ci. La loi de Young-Dupré nous permet donc de déterminer l'angle fixé par l'équilibre de ces trois tensions de surface (Équation V.4). La qualité du mouillage d'un liquide sur un solide est le degré d'étalement du liquide sur un solide. On parle de mouillage total lorsque le liquide s'étale totalement (l'angle de contact est alors nul), et de mouillage partiel lorsque le liquide forme une goutte sur le solide.

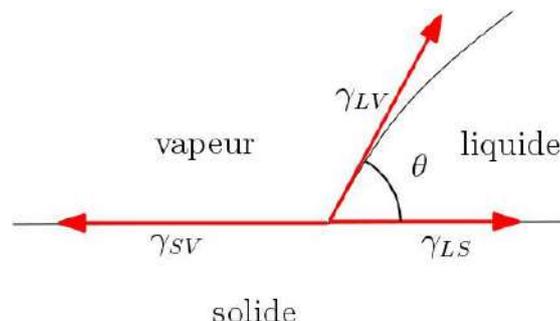


FIGURE V.4 – Angle de contact entre une goutte d'eau avec une surface solide, où  $\gamma_{SV}$ ,  $\gamma_{SL}$  et  $\gamma_{LV}$  sont respectivement les tensions superficielles solide/vapeur, solide/liquide et liquide/vapeur

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (\text{V.4})$$

Nous allons implanter la loi de Bingham Papanastasiou sur le logiciel COMSOL Multiphysics

### ***Bingham-Papanastasiou***

$$\tau = \tau_0[1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{V.5})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement,  $\tau_0$  est le seuil de cisaillement,  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement et  $m$  est le paramètre de régularisation.

Pour notre étude, nous avons considéré trois types de pâte de ciment : P040, P050, P060. Dans la Figure V.5, la légende des couleurs représente la variation de la fraction volumique entre l'air et la pâte de ciment. La couleur rouge représente 100% de la fraction volumique de l'air et 0% de la fraction volumique de la pâte de ciment. La couleur bleue présente 100% de la fraction volumique de la pâte de ciment et 0% de la fraction volumique de l'air. L'angle de

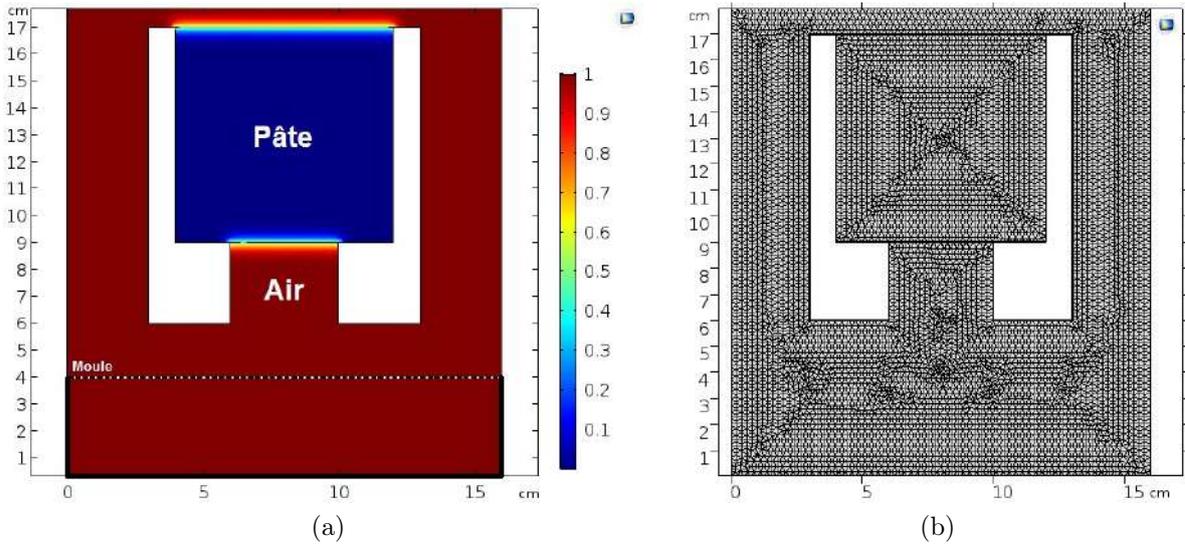


FIGURE V.5 – Présentation de la simulation numérique a) Géométrie de simulation d'écoulement des pâtes des ciments b) son maillage triangulaire d'une taille maximale de 0,25 cm avec 10486 éléments et 544 éléments de limite

contact entre le fluide et la paroi du moule est de  $90^\circ$  (paroi mouillée). La taille du moule est de  $4 \times 16 \text{ cm}^2$  identifiée par une ligne pointillée sur la figure. Pour avoir les mêmes conditions d'humidité de paroi que celles de la simulation, nous mouillons les parois du moule avant d'effectuer la vidange de la pâte. La pâte frais est placée dans la partie haute d'un récipient carré (bleu). La pâte doit tomber par son propre poids jusqu'à ce qu'elle remplisse le moule. La simulation a été lancée dans le réseau Cloud ESTP qui a une mémoire de 128 Gb avec 16 processeurs. Le temps de calcul est variable entre 5-10 heures selon les différents échantillons. Par exemple, pour la pâte P040 le temps de calcul est d'environ 9h 50 min, pour la pâte P050 il est de 5h et pour la pâte P060 il est d'environ 4h 30 min. Le temps d'écoulement de calcul a été de 10 secondes.

Les propriétés rhéologiques de ces pâtes ont été obtenues à partir des essais réalisés au chapitre IV. A partir de ces résultats nous verrons l'influence de la variation du rapport E/C sur le temps de remplissage des pâtes et le profil d'écoulement des pâtes de ciment dans les moules. Les résultats obtenus par la simulation seront comparés à des essais expérimentaux. Pour cela, nous avons préparé un moule en plexiglas qui a la même dimension que celui utilisé pour la simulation numérique (Figure V.3). Les calculs sont réalisés en utilisant les paramètres obtenus par la loi de Bingham-Papanastasiou représentée sur la Figure V.6.

## V.2.2 Résultats numériques

### V.2.2.1 Écoulement de la pâte P040

Nous avons effectué la simulation numérique de la pâte, dont les propriétés rhéologiques sont :  $\tau_0 = 252$ ,  $\mu = 0.53$  et  $m = 1.37$ . La courbe d'écoulement de la pâte P040 obtenue à partir des valeurs expérimentales est représentée sur la Figure V.7.

Nous présenterons ensuite les résultats de la simulation numérique. Ces résultats seront comparés aux résultats obtenus expérimentalement.

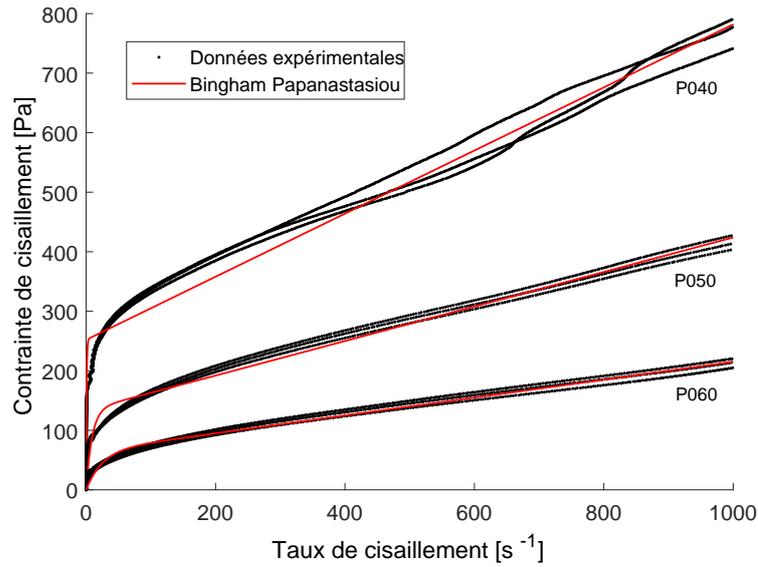


FIGURE V.6 – Variation des courbes rhéologiques de pâtes : P040, P050 et P060

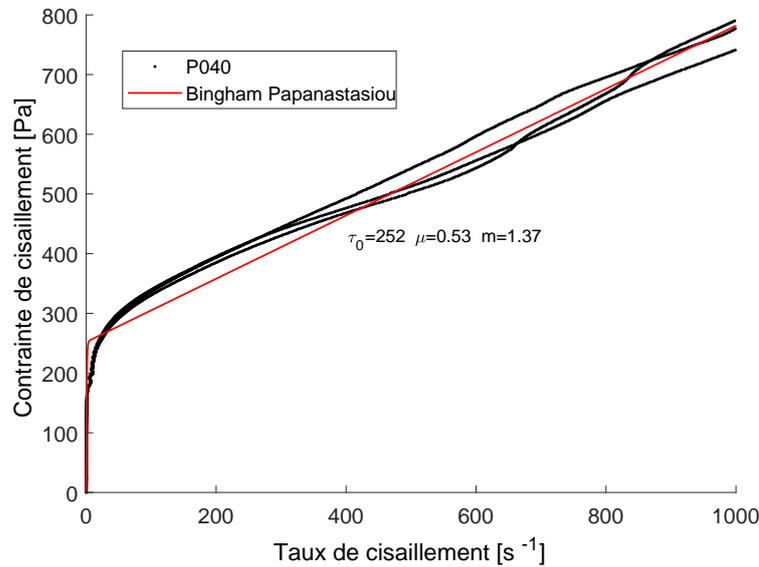
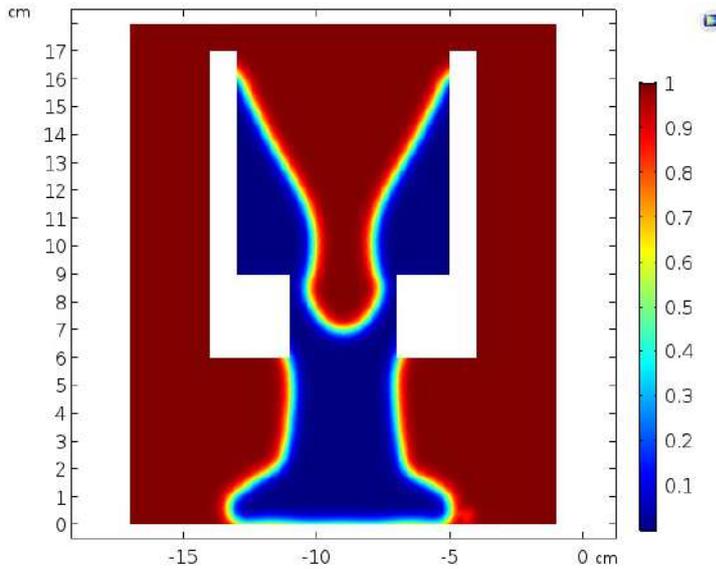


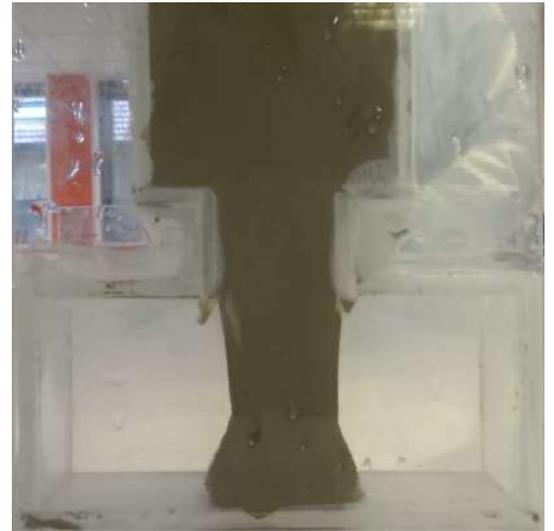
FIGURE V.7 – Ajustement de données expérimentales en utilisant le modèle de Bingham Papanastasiou pour une pâte de ciment P040

A partir de la Figure V.8, nous pouvons voir la différence entre une simulation et un essai expérimental de la pâte P040 après 1 seconde d'écoulement. De cette façon, nous pouvons voir qu'entre la simulation et l'expérimentation il y a une grande similitude avec le même profil d'écoulement. Dans la partie supérieure du moule en plexiglas, nous ne pouvons pas voir le profil de l'écoulement de la pâte, car la pâte reste collée à la paroi.

Après 5 secondes (Figure V.9) nous observons la comparaison entre la simulation et l'essai expérimental de la pâte P040. D'une part nous avons un profil symétrique dans la simulation et un profil asymétrique dans l'expérimentation. Le problème de la non-symétrie de l'expérimentation pourrait être dû à plusieurs facteurs. Un facteur pourrait être l'irrégularité de la table où l'essai a été fait. La table était peut être un peu inclinée vers la droite et la pâte coulait surtout de ce côté. Un autre facteur pourrait être dû à un défaut de la surface au fond ou sur les deux côtés de la paroi du moule. Quel que soit le problème qui a causé le flux asymétrique, nous pouvons mettre en évidence la similitude dans le temps et le profil

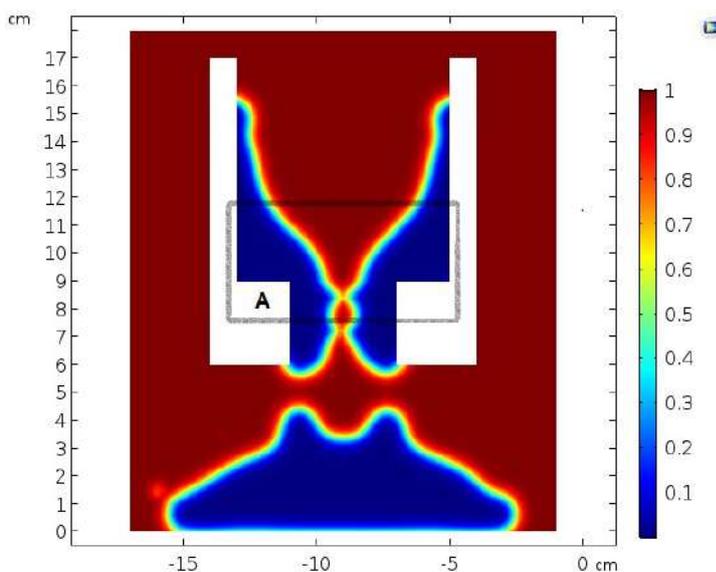


(a)

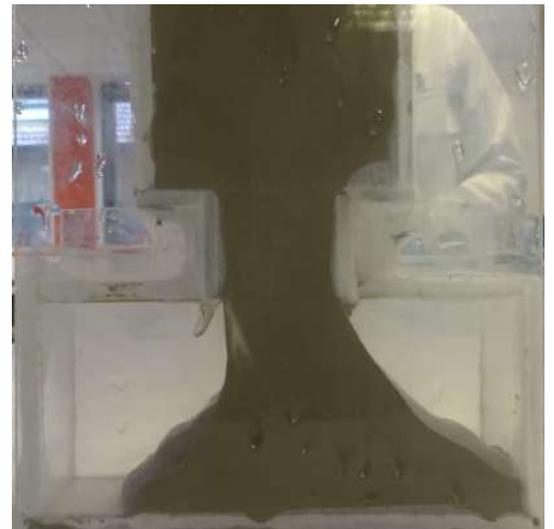


(b)

FIGURE V.8 – Écoulement de la pâte de ciment P040 après 1 seconde : (a) Simulation et (b) expérimentation



(a)



(b)

FIGURE V.9 – Écoulement de la pâte de ciment P040 après 5 secondes : (a) Simulation et (b) expérimentation

d'écoulement de la pâte, qui sont similaires.

D'un autre côté, nous voyons dans la simulation que les pâtes sont pratiquement divisées en deux parties. Une partie qui est dans le moule, et l'autre partie qui est encore dans le réservoir de moule. Cet aspect n'est pas détectable dans l'expérimentation. Cela est dû, comme nous l'avons déjà dit, à une quantité de pâte qui reste collée à la paroi du moule, ce qui nous empêche de voir le profil final. Enfin, nous pouvons comparer le profil d'écoulement à la fin du temps d'écoulement de la partie supérieure du réservoir. Il convient de noter qu'après 5 secondes, le flux des pâtes est arrêté. Cela signifie que les pâtes ne bougent plus.

De cette façon, à partir de la Figure V.10, nous pouvons voir dans le moule en plexiglas, qu'il y a une grande quantité de pâte qui reste collée à la paroi du réservoir, comme nous pouvons le voir dans la simulation.



FIGURE V.10 – Réservoir de la moule en plexiglas avec le reste du matériaux de la pâte collée dans les parois dans la pâte P040

### V.2.2.2 Écoulement de la pâte P050

Cette fois, nous avons effectué la simulation numérique de la pâte P050. Dont les propriétés rhéologiques sont :  $\tau_0 = 134$ ,  $\mu = 0.29$  et  $m = 0.11$ . La courbe d'écoulement de la pâte P050 obtenue à partir des valeurs expérimentales est représentée sur la Figure V.11

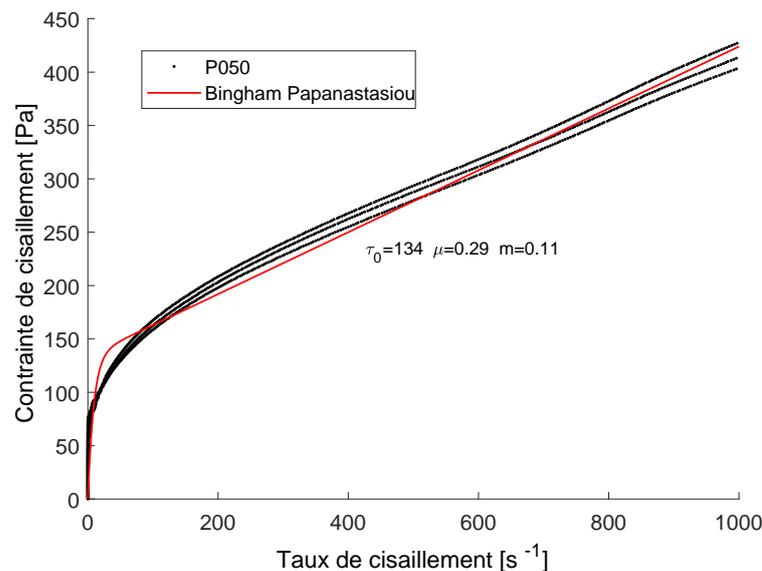


FIGURE V.11 – Ajustement de données expérimentales en utilisant la formule de Bingham Papanastasiou pour une pâte de ciment P050

Comme dans le cas précédent, nous avons comparé les résultats de la simulation numérique avec ceux issues des essais expérimentaux.

A partir de la Figure V.12, nous pouvons voir la différence entre une simulation et un essai expérimental de la pâte P050 après 1 seconde d'écoulement. Nous pouvons voir qu'entre la simulation et l'expérimentation il y a une grande similitude de profil d'écoulement. Dans la partie supérieure du moule en plexiglas, nous ne pouvons pas voir en soi le profil de l'écoulement de la pâte, car la pâte reste collée dans la paroi. De la même manière, nous pouvons voir la trace de l'écoulement des pâtes par les côtés de la paroi.

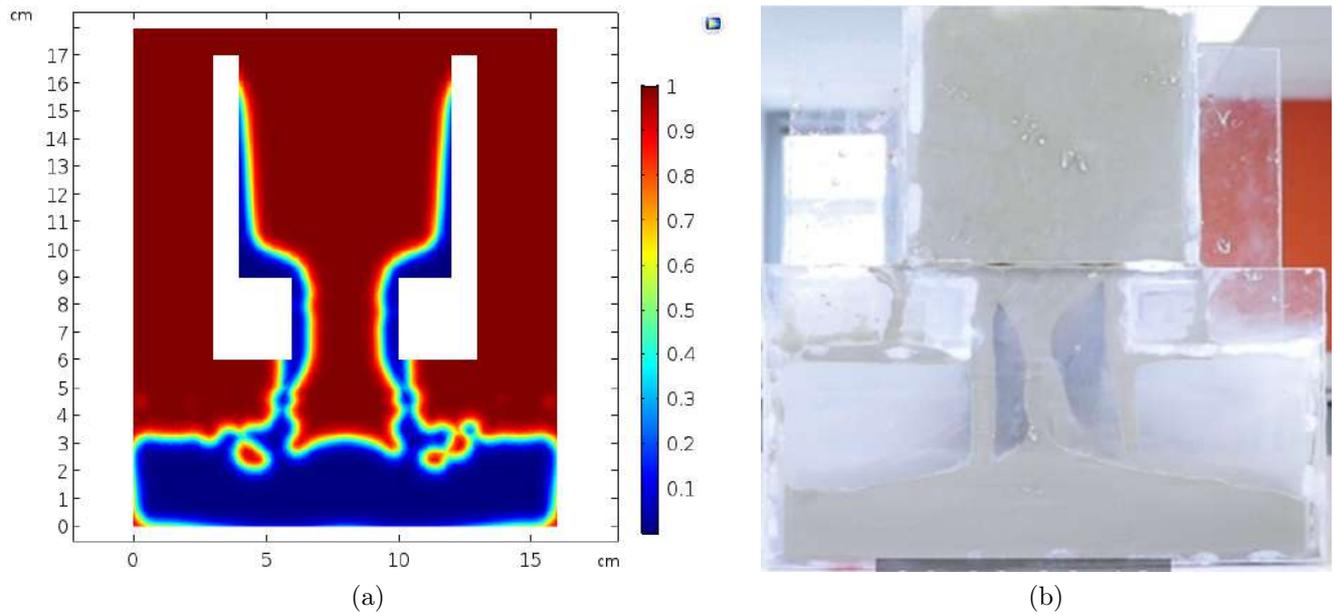


FIGURE V.12 – Écoulement de la pâte de ciment P050 après 1 seconde : (a) Simulation et (b) expérimentation

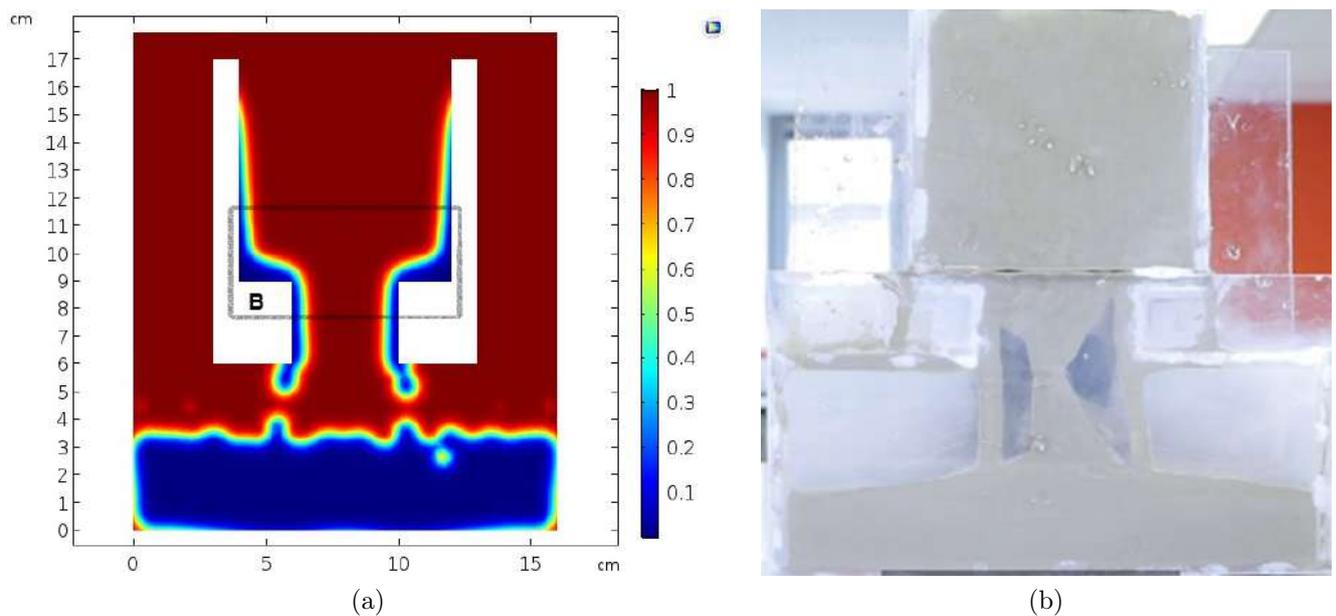


FIGURE V.13 – Écoulement de la pâte de ciment P040 après 2 secondes : (a) Simulation et (b) expérimentation

Avec le temps, l'écoulement des pâtes de ciment P050 continue. Après 2 secondes nous pouvons voir la différence entre la simulation et l'essai expérimental de la pâte P050 (Figure V.13). Entre la simulation et l'expérimentation, il y a une similarité dans la forme du profil d'écoulement. Nous pouvons voir que presque toute la pâte a traversé le conduit entre le réservoir et le moule. Nous pouvons voir que le passage de la pâte laisse une trace sur les parois du moule en plexiglas. Ce qui implique qu'une quantité de matière reste collée au mur. Après 3 secondes d'écoulement, presque toute la pâte a traversé le conduit. Le reste de la pâte reste collé à la paroi du réservoir. Ceci expliquerait la raison de la différence dans la quantité de matière présente dans la simulation et l'expérimentation. Finalement, nous pouvons mettre

en évidence une similitude dans le temps d'écoulement obtenue par simulation et celui obtenu expérimentalement de la pâte, qui sont pratiquement similaires.

De même, nous pouvons observer la quantité de matière qui reste dans le réservoir. À partir de la Figure V.14, nous pouvons remarquer qu'il y a effectivement une quantité importante de matière dans le réservoir. Ceci laisse présager qu'il y a moins de pâte dans le moule.



FIGURE V.14 – Réservoir d'une moule en plexiglas avec le reste de matériaux de la pâte collés aux parois (P050)

### V.2.2.3 Écoulement de la pâte P060

Nous effectuerons la simulation numérique de la pâte, dont les propriétés rhéologiques sont :  $\tau_0 = 65$ ,  $\mu = 0.15$  et  $m = 0.04$ . La courbe d'écoulement de la pâte P060 obtenue à partir des valeurs expérimentales est représentée sur la Figure V.15.

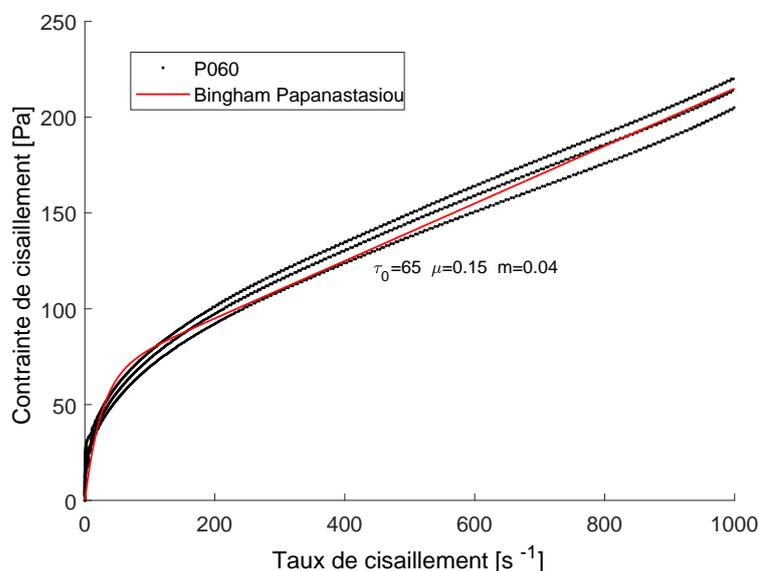


FIGURE V.15 – Ajustement de données expérimentales en utilisant le modèle de Bingham Papanastasiou pour une pâte de ciment P060

Comme dans les cas précédents (P040 et P050), nous présenterons les résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux. Ces résultats seront comparés et nous obtiendrons nos conclusions à partir de nos observations.

L'écoulement de la pâte P060 est très rapide. C'est pourquoi nous devons présenter une image de flux après 0,5 seconde (Figure V.16). À partir de la figure, nous pouvons voir une

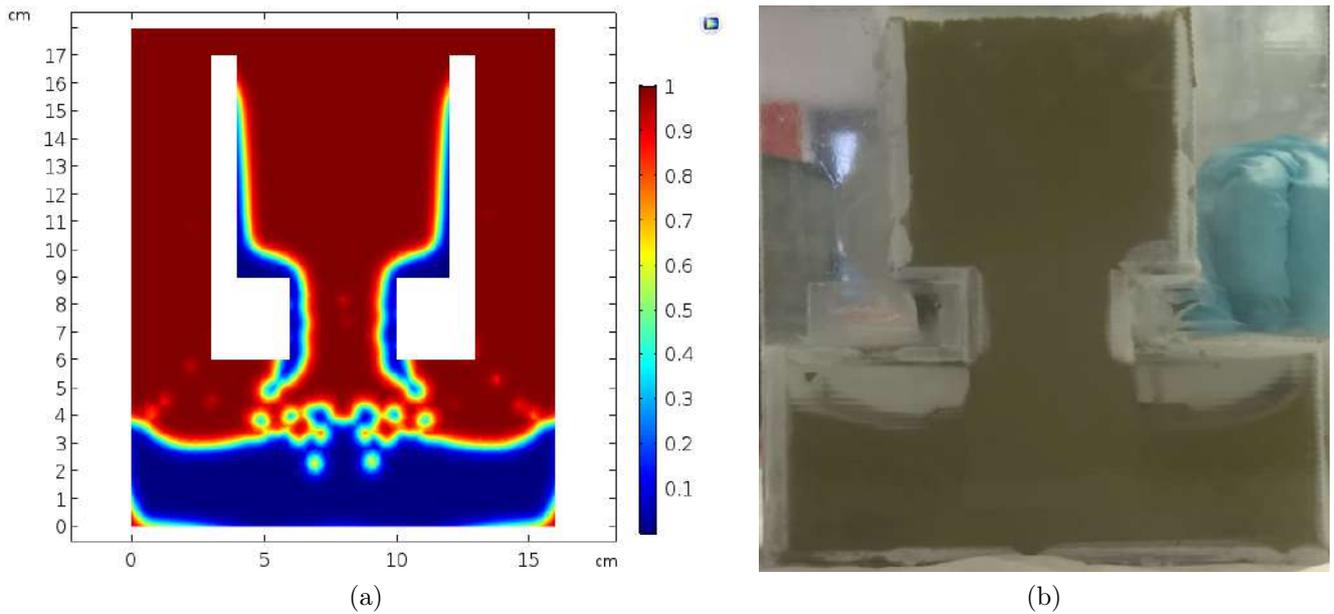


FIGURE V.16 – Écoulement de la pâte de ciment P060 après 0.5 seconde : (a) Simulation et (b) expérimentation

grande similitude entre la simulation et l'expérimentation. À travers le moule en plexiglas, il est difficile de voir ce qui se passe dans le réservoir ou sur les côtés du moule, car la pâte laisse une trace pendant son écoulement.

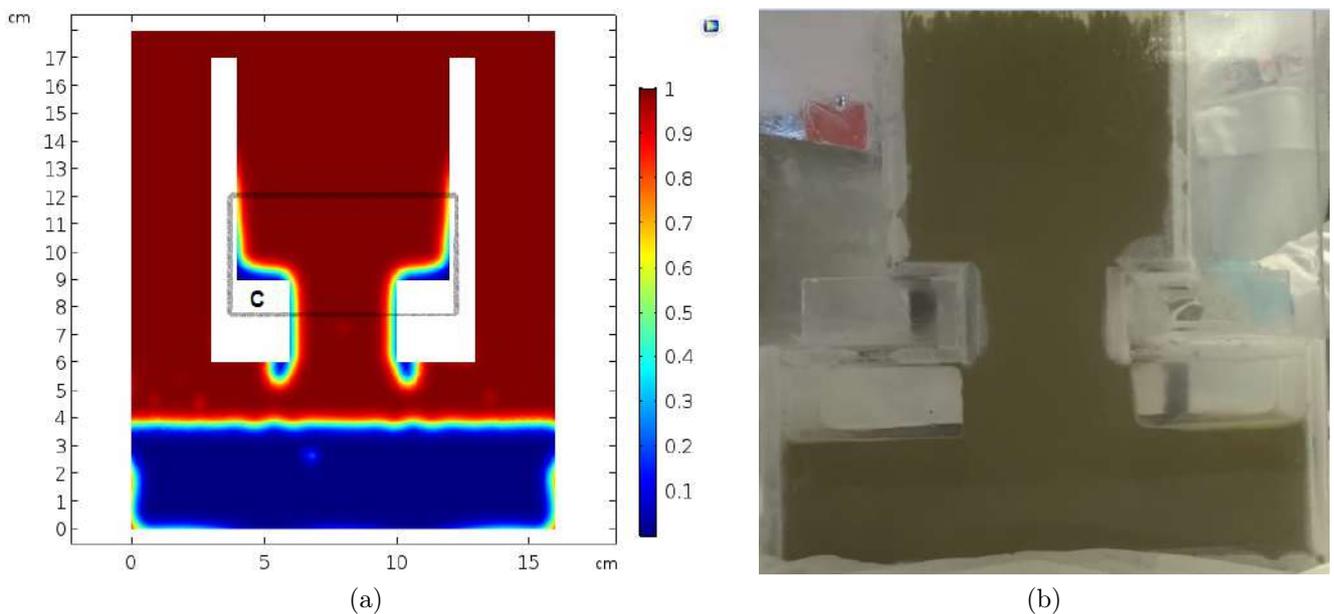


FIGURE V.17 – Écoulement de la pâte de ciment P060 après 2 secondes : (a) Simulation et (b) expérimentation

Selon l'expérience et la simulation, nous avons observé que la pâte a complètement traversé le conduit. Cela signifie que le temps de remplissage de la pâte P060 est de 2 secondes, 1 seconde plus rapide que la pâte P050. De même on peut observer selon la Figure V.17, la forme plate du remplissage à la fin de l'écoulement. D'un autre côté, nous pouvons remarquer que la quantité de matière observée entre la simulation et l'expérimentation est similaire. On

pourrait dire que par rapport aux autres (P040 et P050), la quantité de matière qui reste coincée ou collée dans la paroi du moule est moins importante. Effectivement, nous pouvons voir que le matériau qui est resté dans le réservoir de notre moule est minime par rapport aux autres.

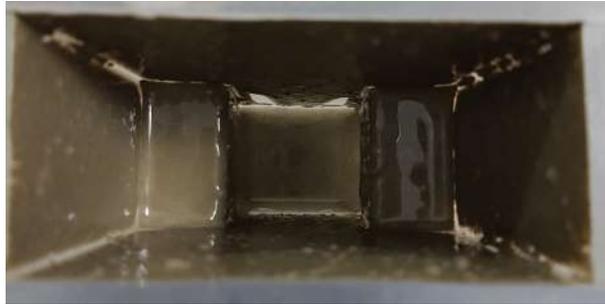


FIGURE V.18 – Réservoir de la moule en plexiglas avec le reste du matériaux de la pâte collée dans les parois dans la pâte P060

D’après nos résultats, nous avons constaté que l’augmentation du rapport E/C entraîne la diminution du temps de remplissage dans les moules, car les pâtes deviennent plus fluides.

Le modèle mathématique utilisé (Bingham-Papanastasiou) dans notre simulation a été choisi en fonction de nos résultats expérimentaux sur les matériaux cimentaires de type CEM I. Par conséquent, nous ne savons pas si le modèle choisi peut être adapté pour décrire le comportement rhéologique des pâtes de ciment en utilisant d’autres types de ciment. Pour étudier ce point, il serait nécessaire de réaliser des essais rhéologiques avec différents types de ciment. Ces essais pourraient être un point de départ pour l’obtention d’une loi rhéologique qui permettrait de décrire le comportement de tout type de pâte de ciment.

### V.2.3 Observations visuelles de la variation de la teinte des pâtes de ciment

Les échantillons utilisés pour l’essai de remplissage ont été confectionnés dans des moules métalliques de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ , dans le but d’observer des différences de teinte sur les échantillons durcis. Après une journée d’hydratation, ils ont été démoulés. Après 28 jours, ils ont été photographiés. Ces photographies ont été analysées visuellement pour déterminer l’influence du rapport E/C sur la variation de la teinte des surfaces durcies.

A partir de la Figure V.19, nous observons que l’augmentation du rapport E/C entraîne l’augmentation de la clarté (teinte). D’autre part, la rugosité des surfaces peut également être facilement vue visuellement et au toucher. En effet, notre observation confirme bien les résultats expérimentaux du chapitre précédent. Tout d’abord, nous observons que la pâte P040 a de nombreuses pores et qu’elle est plus rugueuse que les pâtes P050 et P060. La pâte P050 a une rugosité intermédiaire. Enfin la pâte P060, elle a l’air très lisse et sans porosité. Pour ce essai, nous n’avons pas les valeurs de clarté car à ce moment-là nous n’avons pas le spectrocolorimètre.



FIGURE V.19 – Variation de la teinte en fonction de rapport E/C : 0.40, 0.50 et 0.60

## V.3 Mise en place d'un mur en pâte de ciment

### V.3.1 Introduction

L'objectif de la simulation est de déterminer le temps de remplissage et les caractéristiques de remplissage d'une pâte de ciment P050 dans un mur de 1 mètre de hauteur sur 30 centimètres de largeur. Le mur a un trou dans sa partie centrale. De cette façon, nous pouvons voir l'effet de la présence d'un obstacle (trou) sous la forme de remplissage à la fin de la simulation. L'angle de contact entre le fluide et la paroi du moule est de 90 (paroi mouillée). Nous effectuerons la simulation numérique de la pâte de ciment, dont les propriétés rhéologiques sont :  $\tau_0 = 134$ ,  $\mu = 0.29$  et  $m = 0.11$ . Les propriétés rhéologiques de ces pâtes ont été obtenues à partir des essais effectués au chapitre IV pour la pâte P050. La loi utilisée est comme dans le cas précédent, la loi de Bingham Papanastasiou.

#### *Bingham-Papanastasiou*

$$\tau = \tau_0[1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{V.6})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement,  $\tau_0$  est le seuil de cisaillement,  $\dot{\gamma}$  est le taux de cisaillement et  $m$  est le paramètre de régularisation. La Figure V.20 montre la géométrie et le maillage de notre mur. Comme le maillage est trop petit par rapport à la taille de la géométrie, il est difficile à voir la taille et la forme du maillage. Cependant avec un agrandissement, nous pouvons donc voir bien la maille triangulaire d'une taille maximale de 1 cm. L'écoulement sera effectué en 2D. Le moule est un système fermé, cela signifie que l'air à l'intérieur de la géométrie sera piégé, la seule chose qui va arriver est que la pâte remplace la place occupée par l'air, et vice versa.

La légende des couleurs représente la variation de la fraction volumique entre l'air et la pâte de ciment. La couleur rouge représente 100% de la fraction volumique de l'air et 0% de la fraction volumique de la pâte de ciment. La couleur bleue présente 100% de la fraction volumique de la pâte de ciment et 0% de la fraction volumique de l'air. La pâte de ciment est placée dans la partie haute d'un récipient rectangulaire (bleu). La pâte doit tomber par

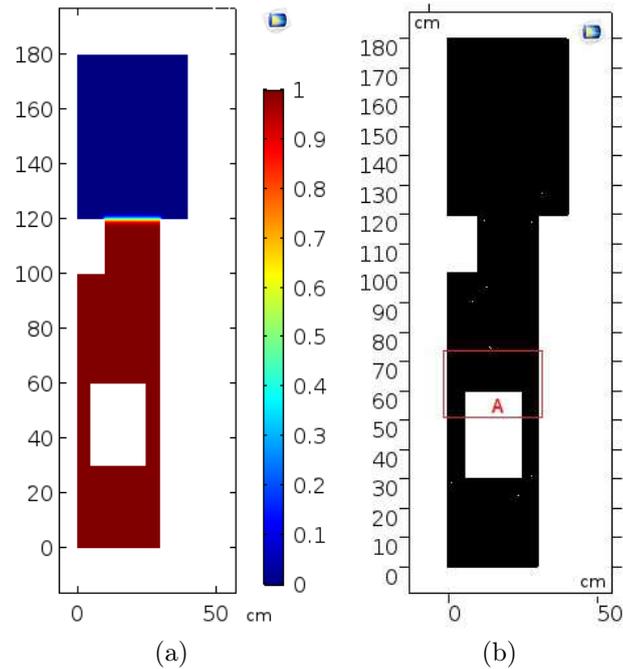


FIGURE V.20 – Présentation de la simulation numérique a) Géométrie de simulation d'écoulement des pâtes des ciment b) son maillage triangulaire d'une taille maximale de 1 cm avec 10486 éléments et 544 éléments de limite

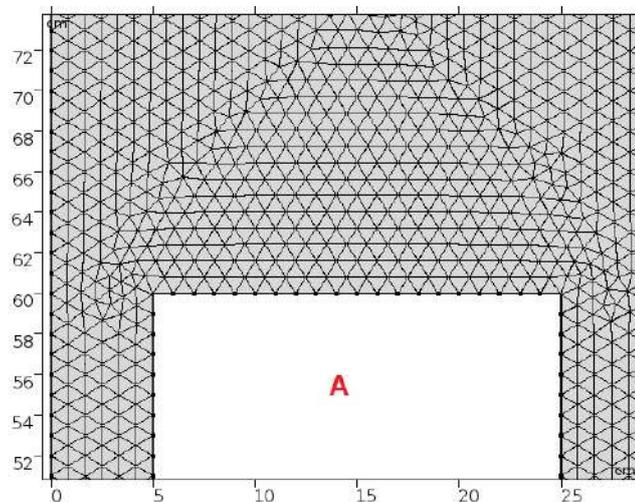


FIGURE V.21 – Agrandissement de la géométrie du mur avec son maillage

son propre poids jusqu'à ce qu'elle remplisse le moule. Le temps de calcul est 4h 30 min. Le temps d'écoulement de calcul a été de 30 secondes.

### V.3.2 Observations

A partir des images, nous pouvons observer montée de l'air vers la partie supérieure en forme de grosse bulles d'air. Une grande partie des bulles d'air reste piégée dans la partie basse du trou du moule. A 15 minutes pratiquement toute la pâte est placée dans le mur.

Au fil du temps, toutes les bulles d'air dans les pâtes de ciment s'échappent vers le haut.

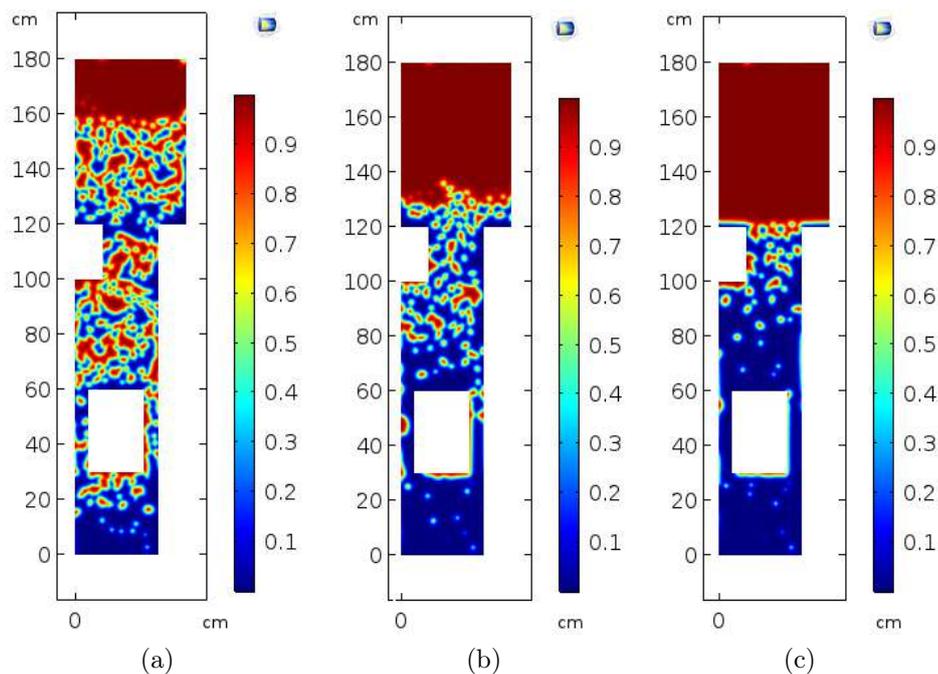


FIGURE V.22 – Écoulement de la pâte de ciment P050 après a) 5 secondes b) 10 secondes et c) 15 secondes

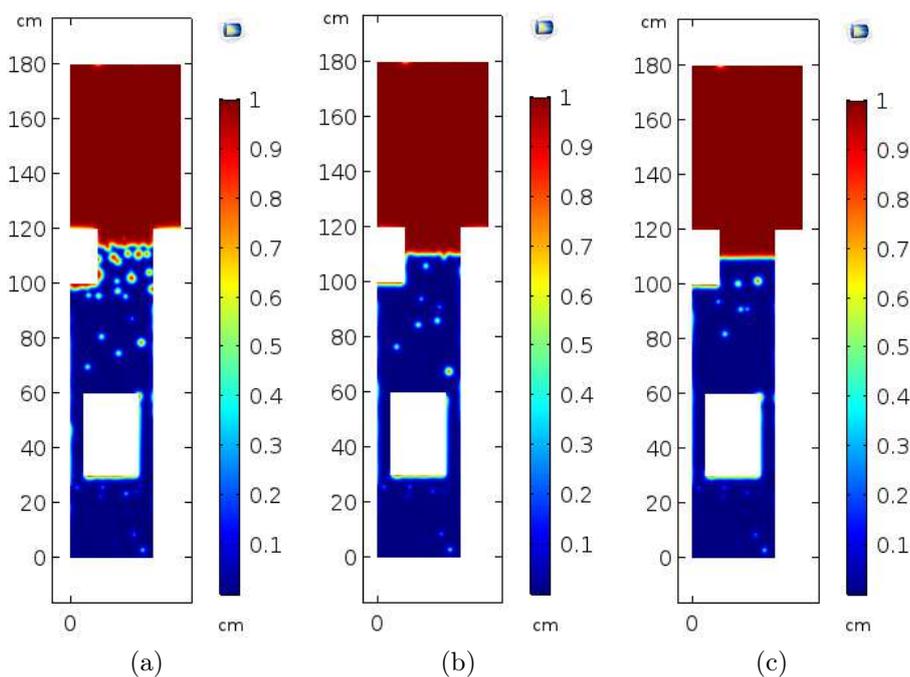


FIGURE V.23 – Écoulement de la pâte de ciment P050 après a) 20 secondes b) 25 secondes et c) 30 secondes

Nous pouvons donc voir qu'à 30 secondes il ne reste plus que quelques grosses bulles d'air dans la partie supérieure du mur, ainsi qu'une certaine quantité d'air dans la partie inférieure du trou dans le mur. Ce type de simulation permet de prédire non seulement le temps de remplissage d'un moule, mais aussi la présence de bulles d'air et d'imperfections lors du remplissage. Il est à noter que le maillage de notre simulation n'est pas très fin qui puisse

nous permettre de voir toutes les bulles d'air inférieures à 1 cm. Cependant cette simulation nous donne de prédiction d'écoulement des pâtes de ciment.

## V.4 Conclusions

De nos simulations sur les pâtes de ciment, nous avons déterminé le temps de remplissage et le profil d'écoulement dans des moules de  $4*4*16\text{ cm}^3$  et d'un mur d'un mètre de hauteur. Pour ces cas nous avons utilisé le logiciel COMSOL multiphysics avec son module CFD. Le temps de calcul des simulations varie en fonction de pâte et de la géométrie du moule. Une pâte fluide d'une viscosité de  $\mu = 0.15$  nécessite moins de temps de calcul qu'une pâte moins fluide ( $\mu = 0.53$ ). A partir de nos résultats, nous avons déterminé l'influence de la variation du rapport E/C sur le temps de remplissage. De nos observations, nous pouvons dire que la variation du rapport E/C influence le temps de remplissage des pâtes dans un moule donné. C'est-à-dire, pour une pâte fluide le temps de remplissage sera court.

D'autre part, ces résultats de la simulation ont été comparés expérimentalement. Pour cela, nous avons utilisé un moule en plexiglas de mêmes dimensions que dans la simulation. Selon notre comparaison, nous avons observé qu'il y a une similitude dans le temps de remplissage et dans la forme du profil de la pâte pendant le remplissage. Finalement nous avons pu prédire le temps de remplissage et la présence de bulles d'air dans un moule d'un mètre.

De même, nous avons observé la relation qui existe entre l'aspect à l'état durci et les propriétés rhéologiques des pâtes. Dans ce cas, les pâtes utilisées pour les essais rhéologiques ont été remplies dans un moule métallique normal. Nous avons confirmé visuellement la variation de couleur des pâtes par rapport à la variation du rapport E/C. Nous observons clairement que l'augmentation du rapport E/C génère l'éclaircissement de la surface des pâtes.

Enfin, à partir de nos observations, numériquement et expérimentalement, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Les paramètres obtenus en utilisant la loi de Bingham-Papanastasiou sont bien adaptés pour décrire l'écoulement des pâtes de ciment.
- La variation de la composition des pâtes détermine la fluidité et le temps de remplissage dans un moule donné. Pour un rapport d'E/C important, on aura une pâte de ciment plus fluide ayant un temps de remplissage bien court. De plus, la pâte de ciment présente une teinte plus claire et plus lisse. En revanche, pour une pâte de ciment avec un rapport de E/C faible, on aura une pâte de ciment moins fluide et un temps de remplissage bien long. Une fois que la pâte a durci, celle ci présente une teinte plus sombre et plus rugueuse.



# CHAPITRE VI

## Conclusions générales et perspectives

Dans nos travaux de recherche, nous avons gardé le type de ciment CEM I pour tous les essais expérimentaux sur les pâtes et les mortiers en faisant varier le rapport E/C. Premièrement, nous avons déterminé la variation de la teinte (clarté) et de la rugosité en fonction du rapport E/C. Deuxièmement, nous avons déterminé les propriétés rhéologiques des pâtes et des mortiers en fonction du rapport E/C (seuil de cisaillement et viscosité). Pour déterminer les paramètres rhéologiques, nous avons travaillé sur trois lois classiques et trois lois modifiées par Papanastasiou. Nous avons réalisé la simulation numérique en utilisant le logiciel COMSOL multiphysics pour déterminer le temps et la forme de remplissage des pâtes de ciment dans un moule donné en utilisant la loi de Bingham-Papanastasiou.

A partir de nos résultats expérimentaux et numériques nous pouvons donner les conclusions suivantes :

1. La clarté de surface des pâtes et des mortiers augmente quand le rapport E/C augmente. Ce dernier augmente la fluidité du matériau.
2. La rugosité de surface des pâtes et des mortiers augmente quand le rapport E/C diminue. Ce dernier diminue la fluidité du matériau. C'est ce qui rend le matériau plus visqueux.
3. D'une manière générale tous les modèles classiques et modifiés par Papanastasiou sont adaptés pour décrire le comportement des pâtes de ciment.
4. De manière générale tous les modèles classiques et modifiés étudiés sont adaptés pour décrire le comportement des mortiers, surtout lorsque les mortiers sont très fluides (rapport E/C supérieur à 0.50).
5. A partir de la loi de Bingham Papanastasiou, le paramètre  $m$  pourrait décrire les interactions interparticulaires entre les grains de ciment, dont l'intensité varie en fonction du rapport E/C.
6. Le modèle Bingham Papanastasiou est bien adapté pour la simulation numérique d'écoulement des pâtes, qui permet de déterminer le temps et la forme de remplissage des pâtes de ciment dans un moule donné.
7. Le temps d'écoulement des pâtes diminuent avec l'augmentation du rapport E/C. Une pâte très fluide aura un seuil et une viscosité faible. Elle s'écoulera très rapidement. Une fois durcie, on obtiendra une surface plutôt claire et moins rugueuse qu'avec des pâtes moins fluides.

Concernant les perspectives, à partir de nos travaux, nous avons réussi à faire une simulation 2D dans un coffrage. La suite serait de faire des simulations de coulage d'éléments réels (poutres, dalles, etc), pour déterminer le temps de remplissage mais aussi prédire la formation de vides d'air qui pourraient avoir lieu au moment de remplissage. La simulation va aider à prévoir certains problèmes de remplissage que nous pouvons rencontrer dans le bétonnage. Ceci serait appliqué à l'impression 3D.

En effet, les propriétés rhéologiques peuvent être utilisées dans l'impression 3D pour la construction de bâtiments. Les architectes et les ingénieurs y trouveront énormément d'avantages pour fabriquer des bâtiments aux formes compliqués et ainsi vaincre les obstacles qui sont liés à la limitation des techniques traditionnelles de construction. L'un des éléments clés de cette procédure pour le développement de la technologie 3D à destination de la construction en génie civil est la maîtrise des caractéristiques des matériaux, notamment de la rhéologie du béton à l'état frais. En effet les bonnes connaissances expérimentales et numériques sur le comportement rhéologique du béton frais, décrit comme un fluide non Newtonien avec un seuil de cisaillement et une fluidité transitoire, sont nécessaires.

Finalement, le béton est un fluide hétérogène et serait important de faire une simulation numérique d'écoulements diphasiques, afin de pouvoir déterminer leur comportement, et identifier l'aspect final de la surface.

# Bibliographie

- ABQ, A. b. Q. (2014a). Faïençage. TECHNOBETON : Bulletin technique.
- ABQ, A. b. Q. (2014b). l'écaillage des surfaces de béton. TECHNOBETON : Bulletin technique.
- Abrams, D. A. (1919). Design of concrete mixtures. Structural Materials Research Laboratory, 1.
- Aïtcin, P. C. (2016). Portland cement. Science and Technology of Concrete Admixtures, pages 27–51.
- Banfill, P. (2006). Rheology of fresh cement and concrete. Rheology reviews, pages 61–130.
- Barnes, H. A. and Nguyen, Q. D. (2001). Rotating vane rheometry — a review. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 98 :1–14.
- Baron, J. and Sauterey, R. (1982). Le béton hydraulique, connaissance et pratique. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.
- Bartos, P., Sonebi, M., and Tamimi, A. (2002). Workability and rheology of fresh concrete : Compendium of tests, report of rilem technical committee tc 145-wsm, workability of special concrete mixes, rilem publications s.a.r.l, cachan cedex, france (2002). Workability of Special Concrete Mixes.
- Ben-Gall, I. (2010). Data Mining and Knowledge Discovery Handbook : Outlier Detection. Springer.
- Bingham, E. (1922). Fluidity and plasticity. McGRAW-HILL BOOK COMPANY.
- Blasting, G. A. (2018). Concrete surface prep part 1 : Unsound concrete.
- Bogue, R. H. (1952). La chimie du ciment portland. Eyrolles.
- Caroline E. Wagner, Alexander C. Barbati, J. E. A. S. B. G. H. M. (2017). Quantifying the consistency and rheology of liquid foods using fractional calculus. Food Hydrocolloids, 69 :242–254.
- CERIB (2007). Méthode de détection des pyrites dans les granulats. CERIB.
- Chagas, L. (1999). La gestion de la couleur.
- Chemical, C. (2018). Crete lease 880 release agent.
- CIB, C. I. d. B. p. l. R. (1974). Tolerances on blemishes of concrete : Cib rapport nro 24. CIB.
- CIMbeton (2005a). La maîtrise esthétique des parements en béton. CIMbeton.
- CIMbeton (2005b). Les constituants des bétons et des mortiers. Collection technique Cimbéton, CT-G10(G10).
- CIMbeton (2013). Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre, volume CT-G11. CIMbeton.
- Cimbéton (-). La vibration des bétons. Collection technique Cimbéton.
- Connesa, P., Alexye, T., Detterichg, J., Romanaa, M., Hardy-Dessourcesa, M.-D., and Ballas, S. K. (2016). The role of blood rheology in sickle cell disease. Blood Reviews, 30 :111–118.
- Coussot, P. and Ancey, C. (1999). Rhéophysique des pâtes et des suspensions.

- D, C. (1986). Yield stress : a time dependent property and how to measure it. Rheological Acta, 25 :542 – 554.
- Dapolito, L. (2013). Résumé de la conférence "formuler la couleur dans le verre" donnée à sars poterie lors des 6 ème "journées de la perles de verre".
- David A. Williams, Aaron W.Saak, H. M. (1998). The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. Cement and Concrete Research, 29 :1491–1496.
- Doraiswamy, D. (2002). The origins of rheology : A short historical excursion. DuPont iTechnologies, Experimental Station.
- Dow, C. and Glasser, F. P. (2003). Calcium carbonate efflorescence on portland cement and building materials. Cement and Concrete recherche, 33 :147–154.
- Dufour, F. (2002). Développements de la méthode des éléments finis avec des points d'intégration lagrangiens : applications à la geomécanique. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes.
- Eiffage, C. (-a). Bullage.
- Eiffage, C. (-b). Efflorescence.
- Eiffage, C. (-c). Nid de cailloux.
- Eiffage, C. (-d). Pommelage.
- Eiffage, C. (-e). Ressuage.
- Einstein, A. (1911). Berichtigung zu meiner arbeit : Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. Annalen der Physik, 339 :591–592.
- Ferrer, B., Bogas, J. A., and Real, S. (2016). Service life of structural lightweight aggregate concrete under carbonation-induced corrosion. Construction and Building Materials, 120 :161–171.
- Feys, D., Cepuritis, R., Jacobsen, S., Lesage, K., Secrieru, E., and Yahia, A. (2017). Measuring rheological properties of cement pastes : most common techniques, procedures and challenges. RILEM technical letters, 2 :129–135.
- Flatt, R. J. (2001). Polymeric dispersants in concrete. Polymers in Particulate Systems : Properties and Applications.
- Geoffray, J.-M. (1991). Défauts d'aspects des parements en béton. LCPC-Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Geoffray, J.-M. (2004). Résultats et recommandations du projet national CALIBE : La maîtrise de la qualité des bétons. Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Grampeix, G. (2013). Vibration des béton. PhD thesis, Université Paris-Est.
- Guo, Y., Zhang, T., Wei, J., Yu, Q., and Ouyang, S. (2017). Evaluating the distance between particles in fresh cement paste based on the yield stress and paticle size. Construction and building materials, 142 :109–116.
- Haraldsson, O. and Elvar, J. (2011). Rheology as a tool in concrete science : The use of rheographs and workability boxes. Elvesier.
- Herschel, W. H. and Bulkley, R. (1926). konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen. Kolloid-Zeitschrift, pages 291–300.
- Houst, Y. F., Bowen, P., and Siebold, A. (2002). Some basic aspects of the interaction between cement and superplasticizers. Swiss Federal Institute of Technology, Institute of Materials Science, Powder Technology Laboratory, MXD.
- Hu, J. and Wang, K. (2011). Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. Construction and Building rheology, 25 :1196–1204.

- Hurd, M. (1990). Avoiding arguments over architectural concrete. The Aberdeen Group.
- Infociments (2016). Glossaire.
- Izoret, L. (1992). Recherche associative atilh : Caractérisation de la teinte des parements pra-91-03. In Réunion ATILH-UTILISATEURS. Laboratoire Central VICAT.
- Izoret, L. (2014). Paramètres physiques du contrôle de la qualité des parements : une approche phénoménologique.
- Jiang, C., Wu, Y.-F., and Dai, M.-J. (2018). Degradation of steel-to-concrete bond due to corrosion. Construction and Building Materials, 158 :1073–1080.
- Jolicoeur, C. and Simard, M.-A. (1998). Chemical admixture-cement interactions : Phenomenology and physico-chemical concepts. Cement and Concrete Composites, 20 :87–101.
- Kaci, A. (2008). Comportement Rhéologique des mortiers industriels. PhD thesis, École Normale Supérieure de Cachan.
- Kennedy, D. (2014). level set methods for two-phase flows with fem. Uppsala Universitet.
- Kiprotech, L. (2016). Comprendre la pollution électromagnétique et ses effets nocifs sur notre santé.
- Kompatscher, M. (2007). Efflorescence. BASF the chemical company.
- Kreijger, P. C. (1984). The skin of concrete composition and properties. Matériaux et Constructions, 17 :275–283.
- Lallement, I. (2001). Hétérogénéités de teinte des parements en béton : caractérisation et identification des mécanismes. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise.
- Larrard, F., Ferraris, C. F., and Sedran, T. (1998). Fresh concrete : A herschel-bulkley material. Materials and Structures, pages 494–498.
- Lassalle, A. and Legrand, C. (1980a). Contribution à l'étude de l'efficacité des vibrateurs internes. Matériaux et constructions, 13.
- Lassalle, A. and Legrand, C. (1980b). Évolution du comportement rhéologique d'une pâte de ciment fraîche suivant la distance à une source vibrante. Matériaux et constructions, 13.
- Lekner, J. and Dorf, M. C. (1988). Why some things are darker when wet. Applied optics, 27 :1278–1280.
- Lemaire, G. (2003). contribution a la maîtrise de la qualité des parements de béton. PhD thesis, Université Toulouse III.
- M., B. and C., L. (1977). Influence de la pâte interstitielle sur l'aptitude à l'écoulement du béton frais. rôle joué par l'eau retenue par les granulats. Matériaux et constructions, pages 365–373.
- Mahasenan, N., Smith, S., and Humphreys, K. (2003). The cement industry and global climate change : Current and potential future cement industry co2 emissions. Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference, II :995–1000.
- Martin, M. (2007). Étude de la texture de la surface coffrée des parements verticaux en béton. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise.
- Minolta, K. (1994). Analyse des couleurs, parlons clair. Konica Minolta.
- Mitsoulis, E. (2007). Flow of viscoplastic materials : Models and computations. Rheology Reviews, pages 135–178.
- Mori, H. and Tanigawa, Y. (1992). Simulation methods for fluidity of fresh concrete. Memoirs of the School of Engineering, pages 71–133.
- Neville, A. M. (2000). Propriétés des bétons. Eyrolles, Éditions eyrolles edition.

- Ozyildirim, C. (1996). Guide for consolidation of concrete. American Concrete Institute, 309r-96.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. Materials Journal, 88(2) :186–196. (Document Name : 88-M24).
- Papanastasiou, T. (1987). Flows of materials with yield. Journal of Rheology, 31 :385–404.
- Pigments, D. C. C. (2017). Davis colors concrete pigments.
- Rossel, N., Geiker, M. R., Dufour, F., Thrane, L. N., and Szabo, P. (2007). Computational modeling of concrete flow : General overview. Cement and Concrete Research.
- Rossel, N. and Gram, A. (2014). Simulation of Fresh Concrete Flow. Springer Netherlands.
- Roussel, N. (2012). Understanding the rheology of concrete. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., and Brumauda, C. (2012). The origins of thixotropy of fresh cement pastes. Cement and Concrete Research, 42 :148–157.
- Saak, A. W., Jennings, H. M., and Shah, S. P. (2001). The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. Cement and Concrete Research, 31 :205–212.
- Shea (2018). How to easily repair your pitted and spalled concrete.
- Shyshko, S. (2013). Numerical simulation of the rheological behavior of fresh concrete. PhD thesis, Technische Universität Dresden.
- Siewczyńska, M. (2012). Method for determining the parameters of surface roughness by usage of a 3d scanner. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 12 :83–89.
- Society, T. C. (2013). Aggregate transparency.
- Stamenkovic, H. (1973a). Causes, mechanisms and control of surface voids in concrete. Matériaux et constructions, 6.
- Stamenkovic, H. (1973b). Surfaces voids can be controlled. The aberdeen group.
- Strehlein, D. and P., S. (2008). Dark discoloration of fair-face concrete surfaces - transport and crystallization in hardening concrete. Advanced Concrete technologie.
- Susan Msinjilia, N., Schmidta, W., Motaa, B., Leinitza, S., Kühnea, H.-C., and Roggeb, A. (2017). The effect of superplasticizers on rheology and early hydration kinetics of rice husk ash-blended cementitious systems. Construction and Building Materials, 150 :511–519.
- Sève, R. (2009). Science de la couleur : aspects physiques et perceptifs. Chalagam Edition.
- Taylor, H. (1997). Cement chemistry. Thomas Telford publishing.
- TFB (1966). La teinte gris du béton. Bulletin du ciment, Nro 8.
- TFB, T. u. F. i. B. (1938). Les efflorescences des mortiers et des bétons. Bulletin du ciment, Nro 5.
- TFB, T. u. F. i. B. (1960). Nids de gravier. Bulletin du ciment, Nro 2.
- TFB, T. u. F. i. B. (1976). Soufflures à la surface du béton. Bulletin du Ciment, Nro 10.
- Thompson, M. (1970). Blowholes in concrete surfaces. The Aberdeen Group.
- Thrane, L., Szabo, P., Geiker, M., Glavind, M., and Stang, H. (2004). Simulation of the test method “I-box” for self-compacting concrete. Annual Trans. of the Nordic Rheology Society, page 47–54.
- Trub, U. (1973). Sécrétion de chaux et teinte grise du béton. Bulletin du ciment.

- Trémeau, A. (1999). Eléments de base de la colorimétrie. Laboratoire LIGIV– Université Jean Monnet.
- U.Šebenik, R. M. M. (2017). Rheology of laponite-scleroglucan hydrogels. Carbohydrate Polymers, 187 :290–300.
- Vasilic, K. (2014). A numerical model for self-compacting concrete flow through reinforced sections : a porous medium analogy. Tesis.
- Vénaut, M. (1989). La pratique des ciments mortiers et béton. Editions du moniteur.
- Wallevik, O. H., Feys, Dimitri and Wallevik, J. E., and Khayat, K. H. (2015). Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. Cement and Concrete Research, 78 :100–109.
- Wikipedia (2016). encyclopédie universelle.
- Yang, M., Neubauer, C., and Jennings, H. (1997). Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions : Review and results from paste. Advanced Cement Based Materials, 5 :1–7.
- Zhuguo, L. (2007). State of workability design technology for fresh concrete in japan. Cement and Concrete Research, 37 :1308–1320.



# Quatrième partie

## Annexe

# Table des matières

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>A</b> | <b>Colorimétrie</b>  | <b>137</b> |
| A.1      | Définition . . . . .   | 137        |
| A.2      | Interaction lumière–matière . . . . .                                | 137        |
| A.2.1    | Réflexion . . . . .  | 138        |
| A.2.2    | Diffusion de la lumière par une surface rugueuse . . . . .           | 138        |
| A.3      | L’oeil humain . . . . .  | 138        |
| <b>B</b> | <b>Traitement de données par la méthode de Gauss-Newton</b>          | <b>140</b> |
| <b>C</b> | <b>Défauts des surfaces des parements</b>                            | <b>141</b> |
| C.1      | Défauts liés à la texture des bétons . . . . .                       | 141        |
| C.2      | Défauts liés à la couleur . . . . .                                  | 144        |
| <b>D</b> | <b>Matériau cimentaire</b>   | <b>149</b> |
| D.1      | Introduction . . . . .   | 149        |
| D.2      | Ciment . . . . .   | 149        |
| D.3      | Type de ciments . . . . .  | 149        |
| D.4      | Constituants du ciment . . . . .                                     | 150        |
| D.5      | Granulats . . . . .  | 152        |
| D.6      | Les adjuvants . . . . .  | 152        |
| D.7      | Hydratation du ciment . . . . .                                      | 152        |
| D.8      | Définitions [NF EN 206-1/CN] . . . . .                               | 153        |
| <b>E</b> | <b>Rhéologie</b>   | <b>154</b> |
| <b>F</b> | <b>Vibration du béton</b>  | <b>156</b> |
| F.1      | Rôle de la vibration . . . . .                                       | 156        |
| F.2      | Distance entre vibreurs . . . . .                                    | 156        |
| F.3      | Temps idéal de vibration . . . . .                                   | 157        |
| F.4      | Zone de vibration efficace . . . . .                                 | 157        |
| <b>G</b> | <b>Essais préliminaires</b>  | <b>159</b> |
| G.1      | Études des défauts de surface des parements bruts du béton . . . . . | 159        |
| G.2      | Variation du rapport E/C sur deux couches . . . . .                  | 162        |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| G.3 | Effet de temps d'attente entre 2 levées . . . . .                     | 164 |
| G.4 | Temps de vibration optimal pour les bétons . . . . .                  | 166 |
| G.5 | Effet de la quantité de l'huile de décoffrage sur la teinte . . . . . | 167 |
| G.6 | Visite au chantier . . . . .  | 168 |
| G.7 | Mesure des états de surface . . . . .                                 | 171 |

---



# Annexe A

## Colorimétrie

### A.1 Définition

La colorimétrie est la science de la mesure de la couleur, elle s'appuie sur la théorie trichromatique et sur le concept d'un observateur de référence. Sa principale caractéristique est d'associer à chaque couleur, non plus un spectre de réflectance mais trois valeurs. Son principal intérêt est de permettre, moyennant des conditions d'utilisation très strictes, de discerner, ou de désigner, objectivement toute couleur (Trémeau, 1999).

La couleur est la perception que nous avons des différentes longueurs d'onde qui constituent la lumière visible. La perception des couleurs dépend de l'âge, du sexe, de l'environnement et de la culture personnelle. Il n'existe pas deux personnes qui auront la même perception colorée, ce qui fait de la couleur une expérience psychologique très personnelle et subjective (Minolta, 1994). La couleur d'un objet dépend :

- de la nature de la lumière qui l'éclaire
- de la nature de l'objet éclairé
- des caractéristiques de l'œil et du cerveau

Pour parler de la couleur d'un objet, il faut : Une source lumineuse, un objet qui absorbe, reflète, transmet et diffuse la lumière, et un détecteur (exemple : l'œil) (Figure A.1).

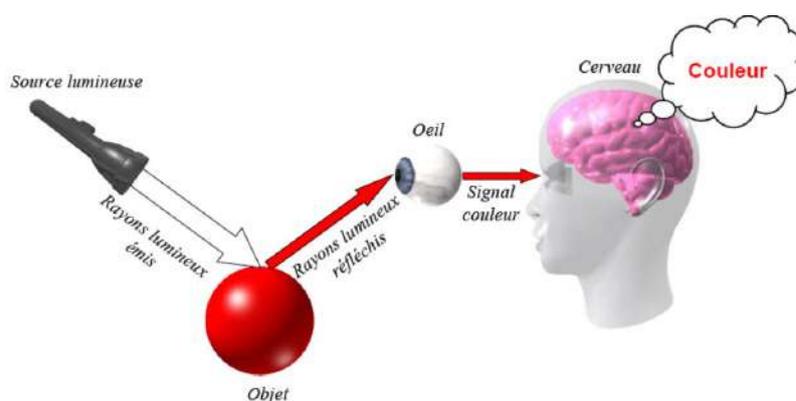


FIGURE A.1 – principe de la perception visuelle humaine

### A.2 Interaction lumière–matière

Quand les rayons lumineux tombent sur la surface d'une matière (opaque ou transparente) une partie est réfléchiée, le reste se propageant dans la matière (réflexion, diffusion et transmission).

## A.2.1 Réflexion

C'est le phénomène qui se produit quand une onde lumineuse tombe d'un milieu optiquement plus dense. Quand un rayon de lumière rencontre un objet, il rebondit sur l'objet, comme une balle sur un mur. On dit que le rayon lumineux est réfléchi. Si la réflexion se fait sur une surface plane, on peut prévoir la trajectoire de la lumière après rebond. Par contre, après réflexion sur une surface non plane, la lumière est diffusée dans toutes les directions. On distingue entre réflexion spéculaire et réflexion diffuse.

- Réflexion spéculaire : dans une surface très régulière, un miroir, la lumière est renvoyée dans une seule direction,
- Réflexion diffuse : la lumière réfléchie par une surface irrégulière ("surface dite rugueuse"), renvoie l'énergie incidente dans une multitude de directions.

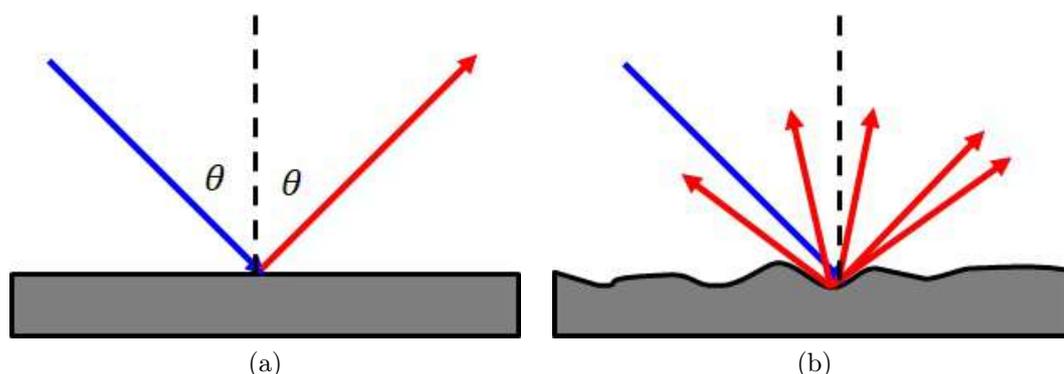


FIGURE A.2 – Réflexion de la lumière dans une surface : (a) spéculaire et (b) diffuse

## A.2.2 Diffusion de la lumière par une surface rugueuse

La surface dans solide peut donner d'informations sur les propriétés physique, chimique, thermique, et optique à partir de la lumière diffuse. La lumière diffusée par une surface rugueuse contient des informations sur la rugosité de la surface. Il y a plusieurs théories qui peuvent décrire la lumière diffuse d'un objet, parmi ces théories, la théorie de Kubelka-Munk est connue et relativement simple. D'après la théorie de Kubelka-Munk, la lumière diffusée par un échantillon dépend de son coefficient de diffusion  $S$  et de son coefficient d'absorption  $K$  :

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\infty)^2}{2R_\infty} \quad (\text{A.1})$$

où  $R_\infty$  est la réflectance diffuse.

## A.3 L'œil humain

L'œil est un organe sphérique de diamètre approximatif de  $D = 20 \text{ mm}$ . La rétine de l'œil, est constituée d'une multitude de petits photorécepteurs (les cônes et les bâtonnets) qui élaborent des signaux de nature électrochimique véhiculés par le nerf optique jusqu'au cortex visuel (Chagas, 1999). On désigne par le terme de "lumière visible" le spectre du rayonnement électromagnétique perceptible par l'œil humain (répartition spectrale entre 380 à 780 nm). Le rayonnement électromagnétique comprend plusieurs catégories de radiations que l'on peut décomposer en fonction de leur longueur d'onde : c'est ce qu'on appelle le spectre électromagnétique (Kiprotech, 2016) (Figure A.3). L'œil humain possède trois cellules de détection de lumière différentes qui fonctionnent dans les niveaux d'éclairage plus élevés. Chacune de ces cellules "cône" est sensible à une gamme différente de longueurs d'onde ; il ne peut envoyer que 3 signaux au cerveau ; les courbes de sensibilité de court («bleu»), moyen ("vert") et à long ("rouge") longueur. Par conséquent le cerveau invente arbitrairement les autres couleurs en combinant leurs signaux ensemble (Figure A.4)(Dapolito, 2013).

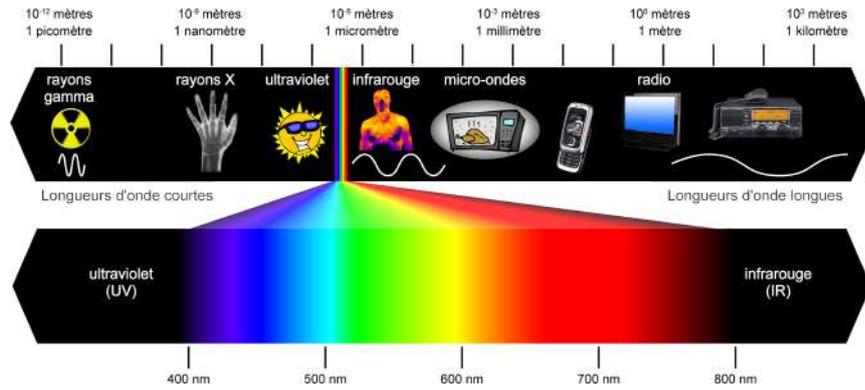


FIGURE A.3 – Le spectre électromagnétique par longueur d'onde croissante

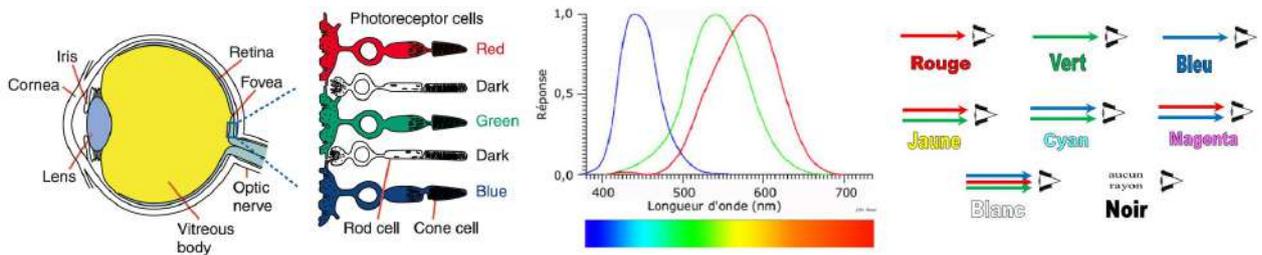


FIGURE A.4 – La vision des couleurs et ses limites

La Commission internationale de l'éclairage (CIE) fondée à Berlin en 1913, est une organisation internationale dédiée à la lumière, l'éclairage, la couleur et les espaces de couleur. Ainsi, la CIE a élaboré plusieurs systèmes de mesures de la couleur, l'espace couleur le plus utilisé dans le monde entier pour déterminer la couleur est l'espace couleur  $L^*a^*b^*$  conçu en 1976. La classification des couleurs se fait en fonction de trois critères : la teinte (couleur), la clarté (luminosité) et la saturation (intensité) (Minolta, 1994).

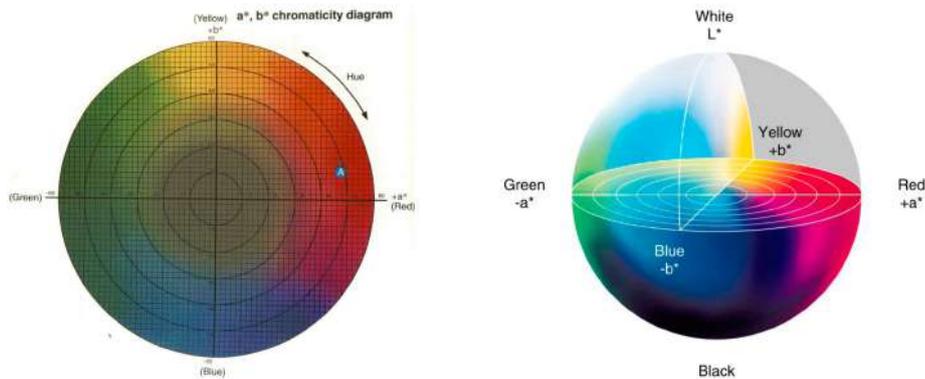


FIGURE A.5 – Espace colorimétrique CIELab

# Annexe B

## Traitement de données par la méthode de Gauss-Newton

En pratique, on est appelé à résoudre des problèmes impliquant des données sur la forme de points, quand nous savons qu'il existe une relation inhérente entre les variables. Nous disposons d'un certain nombre  $m$  de points expérimentaux  $(x_i, y_i)$   $1 \leq i \leq m$  où  $x_i$  et  $y_i$  sont les valeurs prises par les grandeurs  $x$  et  $y$ . nous essayons de déterminer une relation fonctionnelle entre ces deux grandeurs  $x$  et  $y$ . On souhaite trouver  $n$  paramètres  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$  qui ajuste au mieux les données pour une fonction de régression du type  $y = f(x, \beta)$ . C'est-à-dire, on voudrait dans l'idéal que  $f(x_i) = y_i$ . Dans la pratique, on ne peut pas avoir à tous les coups  $f(x_i) = y_i$  pour toutes les données. On cherche alors, pour chaque couple, à minimiser l'erreur de l'approximation par le calcul des résidus( $r_i$ ) :

$$r_i = y_i - f(x_i, \beta) \quad (\text{B.1})$$

En supposant la valeur initiale  $\beta^0$ , du minimum, la méthode procéde par itérations :

$$\beta^{k+1} = \beta^k + \delta\beta \quad (\text{B.2})$$

où  $k$  est une itération avec l'incrémention  $\delta\beta$  vérifié par les équations normales :

$$(J_r^T J_r) \delta\beta = -J_r^T r \quad (\text{B.3})$$

Avec la matrice Jacobien des résidus :

$$(J_r)_{ij} = \frac{\partial r_i(\beta^s)}{\partial \beta_j} \quad (\text{B.4})$$

En utilisant les Équation B.3 et Équation B.4 on obtient :

$$\delta\beta = -(J_r^T r)(J_r^T J_r)^{-1} \quad (\text{B.5})$$

Le processus suit le suivant :

1. On prend  $\beta^0$ .
2. On applique les Équation B.3 et Équation B.4.
3. On vérifie la convergence et répète l'opération. Si est égal à 0, on arrête.

# Annexe C

## Défauts des surfaces des parements

### C.1 Défauts liés à la texture des bétons

#### *Le bullage*

Appelé aussi soufflure, il se caractérise par la présence de vides de forme régulière et sphérique sur la surface des bétons, qui peuvent avoir des tailles variant de quelques mm à quelques cm et qui apparaissent après coulage (TFB, 1976) (Thompson, 1970). Contrairement aux vides de compaction, les bulles d'air bougent lors de la vibration du fait de leur faible densité. Ceci leur permet de s'échapper du mélange vers le haut du coffrage et vers la source de vibration. Le mouvement des bulles d'air dans l'interface béton-coffrage dépend du seuil de cisaillement des bétons, de la méthode de mise en place et de la rugosité de la surface (Martin, 2007). Par rapport à la surface de bullage et le nombre de bulles, selon Lemaire, le rôle du type d'adjuvant est très déterminant (propriétés tensioactives), de même que le type de coffrage utilisé (Lemaire, 2003).

Pour éviter le bullage, on doit limiter la hauteur de chute de 30 à 50 cm pendant la mise en place. Plus la hauteur de chute du béton est importante, plus il y aura d'air entraîné dans le béton frais et plus le risque de bullage sera élevé. Un vibreur enfoncé lentement dans une couche trop épaisse de béton peut provoquer la compaction de la partie supérieure de la couche avant que les bulles de la partie inférieure n'aient eu le temps de s'échapper. Une vibration insuffisante ne permet pas d'éliminer la quantité d'air nécessaire pour éviter le bullage. Il faut aussi éviter les émulsions d'huile dans l'eau, car elles favorisent le bullage (Eiffage, a).

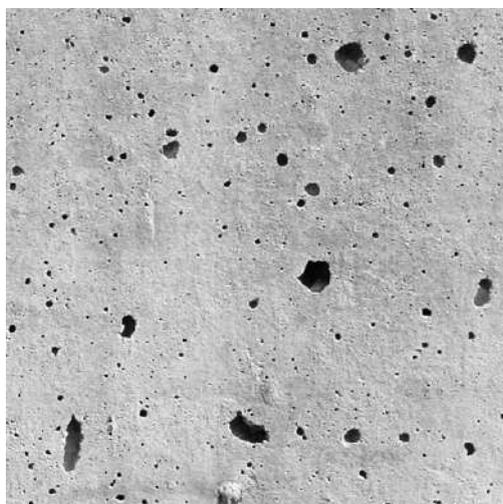


FIGURE C.1 – Phénomène de bullage (Blasting, 2018)

## *Ressuage*

Phénomène d'exsudation de l'eau de gâchage d'un béton avant le début de prise. Ce processus est souvent dû à une formulation insuffisante en fines ([Infociments, 2016](#)). Le ressuage est un phénomène de remontée d'une partie de l'eau contenue dans le béton frais vers la surface du béton. Cette remontée peut provoquer un lavage et la formation de veines sableuses au niveau du parement pendant la vibration : il se manifeste par la présence de zones verticales irrégulièrement érodées ou par des petites rigoles verticales où le sable apparaît délavé (Figure C.2). Les principales causes peuvent être ([Eiffage, e](#)) ([Lemaire, 2003](#)) ([Geoffray, 1991](#)) :

1. Formulation : Excès d'eau, faible teneur en fines, choix d'un ciment lent et peu fin, adjuvants retardateur de prise, granulométrie trop discontinue.
2. Coffrage : État de surface irrégulier, non absorbant et pas assez rigide.
3. Mise en œuvre qui favorise la ségrégation : Les chocs de manutention, une hauteur de chute excessive, déversement le long des parois du coffrage ou en cascade sur les armatures.
4. Vibration : L'excessive vibration conduit la pâte de ciment à se détacher des granulats et à remonter à la surface. Elle peut provoquer la formation d'un réseau de canaux facilitant la remontée de l'eau à la surface.



FIGURE C.2 – Phénomène de ressuage ([Geoffray, 1991](#))

## *Les nids de sable ou de gravier*

Le nid de sable, de gravier ou de cailloux sont des zones du parement où les granulats sont apparents à cause d'un manque de pâte de ciment en surface ([Eiffage, c](#)). Conséquence d'une ségrégation des éléments du béton, liée à une mauvaise mise en place ([TFB, 1960](#)), du coffrage, du matériau ou du démoulant ([Martin, 2007](#)). Les nids de cailloux correspondent à une forte concentration de gros granulats mal enrobés, apparents ou cachés par une mince pellicule de laitance. Ces nids créent des cavités, plus ou moins importantes dû au manque de fine et de mortier. C'est un défaut volumique et pas seulement de surface ([Geoffray, 1991](#)). Les principales causes peuvent être ([Lemaire, 2003](#)) :

1. Dûes à une mauvaise qualité du béton : Ségrégation trop importante, manque de fines, rapport de la masse sable/granulats totale inadapté, une consistance trop ferme.
2. Dûes à la mauvaise mise en œuvre : Fuite de joints entre les coffrages, vibration inadaptée ou mal répartie, hauteur de chute du béton trop élevée.

## *Les vides de compaction*

Ils sont des vides d'air de forme irrégulière qui présentent une agglomération des granulats contre la paroi du coffrage (effet de paroi) et lorsque le mortier ne remplit pas l'espace entre les agrégats grossiers



FIGURE C.3 – nid de gravier (Blasting, 2018)

lors de la mise en place. Ces agglomérations sont liés à la mauvaise distribution des granulats dans la matrice après malaxage. Les vides sont généralement causés par l'utilisation des vibreurs inappropriés ou défectueux, les procédures de placement inappropriées, les procédures de vibration pauvres, des mélanges de béton inappropriés, ou le renforcement congestionné. Finalement, le volume de mortier du mélange et les propriétés rhéologiques du béton, sont les paramètres dominant de la formation de vide de compaction (Ozyildirim, 1996) (Martin, 2007) (Stamenkovic, 1973a) (Stamenkovic, 1973b). Afin de limiter les vides il est conseillé de :

- Utiliser une quantité suffisante de particules fines pour assurer que le volume de mortier est suffisant pour remplir les vides de mélange et de surface,
- Conditionner le sable afin que le mortier puisse avoir une grande plasticité, ce qui permet au mortier de se déplacer facilement entre les graviers, forçant les vides à se déplacer vers le haut du béton.
- Utiliser un sable avec une grande surface spécifique,
- Choisir des granulats lisses, des bords arrondis et une forme presque sphérique si possible, pour diminuer le frottement et la résistance au mouvement pendant la vibration,
- Utiliser un ciment qui soit le plus fin possible, pour diminuer considérablement le frottement entre les granulats,
- Assurer que le malaxage soit suffisant pour disperser les granulats dans la matrice, que les gouttes d'eau bien dispersées se transforment en film d'eau autour des agrégats. Ceci afin d'améliorer l'ouvrabilité du béton,
- Utiliser des coffrages au travers desquels l'eau peut s'évacuer,
- Formuler un béton suffisamment fluide.
- Vibrer suffisamment pour combler les vides de surface (Figure C.4).

## *L'écaillage*

L'écaillage résulte d'une adhérence superficielle du béton à la surface coffrante entraînant des arrachements partiels de la peau du béton au décoffrage; l'emploi ou le changement d'un démoulant peut remédier à la formation de ce défaut (Geoffray, 1991). Après décoffrage, l'écaillage est un phénomène de désagrégation des surfaces de béton provoqué par leur exposition au gel-dégel en présence d'humidité ou de sels déglacants (ABQ, 2014b). Les causes de l'écaillage peuvent être : Un rapport eau/liants trop élevé, l'absence ou insuffisance d'air entraîné, l'inexistence ou insuffisance de la cure, etc.

## *faièncage*

Le phénomène de faièncage se manifeste à la surface du béton. Il affecte son apparence en formant des fissures très minces, dont la dimension moyenne varie de 10 mm à 40 mm. Ces fissures se présentent en réseaux plus ou moins hexagonaux. Le faièncage se manifeste par une micro-fissuration de surface provoquée par une dessiccation due elle-même à un manque de cure. Elles se développent rapidement et peuvent atteindre une

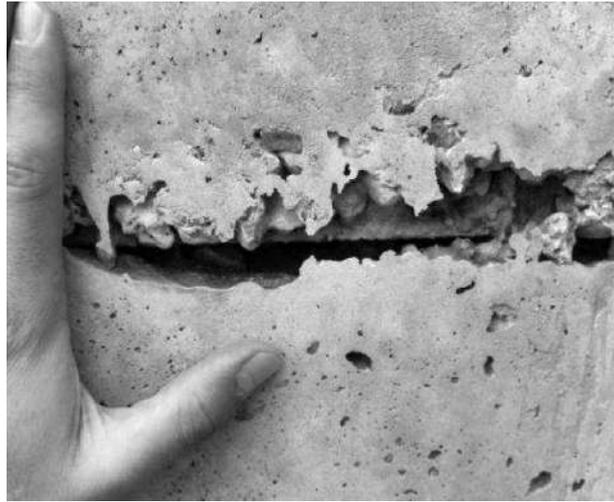


FIGURE C.4 – Vide de compaction dû à une sous-vibration (Grampeix, 2013)



FIGURE C.5 – L'écaillage (Shea, 2018)

profondeur de 3 mm. Elles apparaissent dans les jours suivant la finition du béton. Elles sont généralement visibles lorsque la surface est mouillée et commence à sécher. La principale cause du faïencage provient d'un séchage trop rapide de la pâte de ciment en surface qui entraîne un retrait. Les autres causes peuvent être : l'aplanissage excessif lors de la finition, l'ajout d'eau lors de la mise en place, la mise en place du béton sur une surface très sèche (absorbante), la carbonatation ou l'ajout de ciment lors de la finition (ABQ, 2014a) (Geoffray, 1991).

## C.2 Défauts liés à la couleur

### *Variation de la teinte*

Les variations de teinte sont des différences visuelles de zones juxtaposées entre des surfaces de béton, ces zones peuvent avoir, selon leurs causes, une forme irrégulière ou présenter une géométrie précise (Geoffray, 1991). Pour les constructeurs les surfaces lisses et sans taches ne sont pas faciles à faire. Lorsque le béton doit avoir des dimensions précises avec des tolérances serrées, il est pratiquement impossible de faire un travail vertical coulé complètement uniforme en couleur et exempt de bullage. Les surfaces des bétons peuvent également être tachetées par des changements de couleur liés à des problèmes de consolidation ou des fuites au niveau des joints de revêtement ou des coins. Certaines différences de couleurs, tels que la décoloration de



FIGURE C.6 – Faïençage typique de la surface d'un pilier de béton (Wikipedia, 2016)

l'hydratation sont provoquées par les variations locales de la teneur en eau du béton. Certains concepteurs préfèrent alors des surfaces à motifs et textures plutôt que lisses. D'autant plus que les précautions pour l'obtention d'une surface lisse peuvent être coûteuses à court terme (Hurd, 1990).

Selon (Lallement, 2001), les hétérogénéités de teinte sont présentes sur les mortiers caractérisés par une mise en place difficile (manque d'ouvrabilité). Les bétons coulés dans des moules absorbants ne présentent pas d'hétérogénéités de teinte par rapport aux matériaux cimentaires coulés dans les moules non absorbants, quelles que soient les compositions et les autres conditions expérimentales.



FIGURE C.7 – Variation de la teinte dû au réemploi anarchique de panneaux de coffrage (Geoffray, 1991)

### *Pommelage*

On parle de pommelage ou transparence des granulats, lorsque le spectre des granulats est visible en surface à l'œil nu avec une couleur plus ou moins distincte de celle du fond. Ce spectre peut être dû à l'influence de la masse volumique des granulats plus élevée que les autres constituants du béton, et de la forme des granulats (Geoffray, 1991). Ces spectres peuvent être foncés (pommelage positif, très rare) ou clairs (pommelage négatif) Figure C.8 (Lemaire, 2003). Le pommelage positif n'est en général pas visible au démoulage et apparaît seulement au bout de quelques jours. Cependant, en général le pommelage négatif apparaît plus rapidement, quand la surface du béton est soumise à une dessiccation rapide.

Dans les deux cas, les causes de son apparition peuvent être la présence de gravillons aplatis et orientés parallèlement à la surface du béton, et une survibration qui peut provoquer l'orientation particulière des granulats (Eiffage, d). Pour Bresson, le pommelage est dû à une ségrégation locale du béton conduisant à une différence de porosité entre les gros granulats et le reste du parement. Dans le cas du pommelage positif, il s'agirait d'une concentration locale en éléments fins, essentiellement des grains de ciment, conduisant à un rapport E/C local plus faible. De plus, cette zone étant moins poreuse, la carbonatation y serait plus lente et donc accentuerait encore la différence visuelle par rapport au reste du parement. Dans le cas du pommelage négatif, les granulats seraient situés plus près de la paroi et une fine couche de pâte les séparerait du parement. Dans des conditions favorisant la dessiccation cette fine pellicule de pâte devient très poreuse et donc, selon l'auteur, plus claire que le reste du parement (Lemaire, 2003).

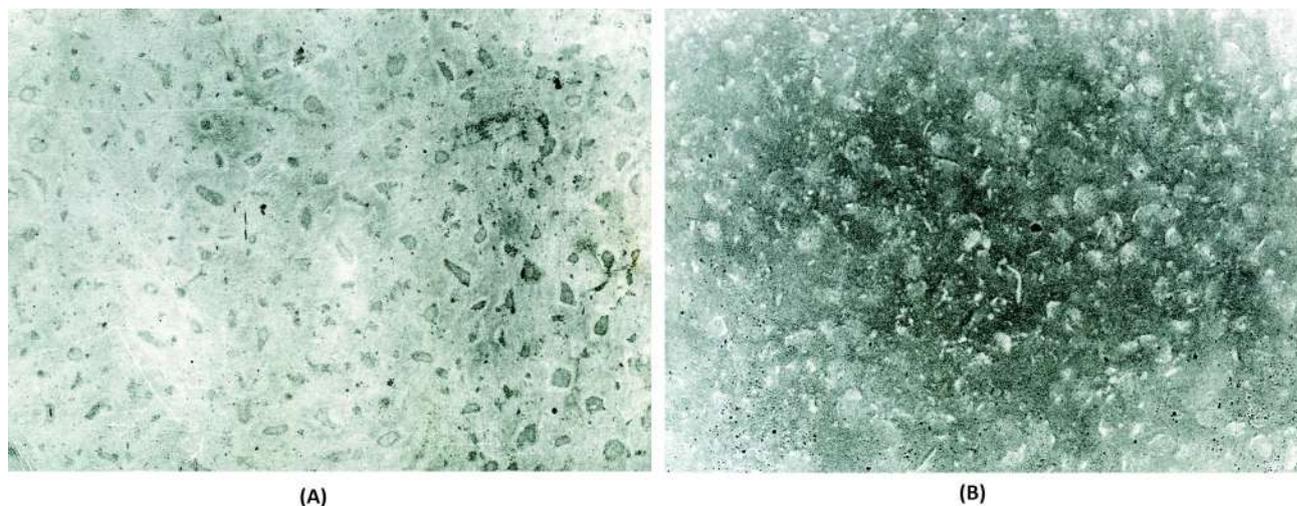


FIGURE C.8 – Pommelage A) Positive et B) Négative (Society, 2013)

## *Efflorescences*

Les efflorescences des matériaux cimentaires sont des formations très désagréables qui portent trop souvent préjudice à la beauté des bâtiments (Figure C.9). Les efflorescences sont des matières cristallines formant une pellicule plus ou moins épaisse sur les surfaces des constructions et provenant de l'évaporation de solutions salines (carbonates, sulfates, chlorures, etc.) (TFB, 1938). Les oxydes de fer du béton peuvent donner à l'efflorescence une teinte jaune / marron (Kompatscher, 2007). La formation d'efflorescences comprend donc 3 phases successives : Dissolution des sels - transport de la solution à la surface - recristallisation des sels par évaporation. Les sels solubles qu'on peut rencontrer en pratique sont : les l'hydrate de chaux  $Ca(OH)_2$ , le carbonate de chaux ( $CaCO_3$ ), les alcalis qui proviennent des différents matériaux, les sulfates de chaux et de magnésium qu'on rencontre dans les sols gypseux et magnésiens, Le salpêtre ( $Ca(NO_3)_2$ ), ou le chlorure de chaux ( $CaCl_2$ ) utilisé le plus souvent comme anti-gel (TFB, 1938). Les efflorescences ne peuvent se produire qu'en présence d'eau à la surface du béton (Dow and Glasser, 2003). On peut distinguer les efflorescences primaires, dues à l'excédent d'eau de gâchage qui entraîne une forte évaporation sur les bétons car la quantité d'eau excédentaire y est élevée, et le béton est alors très poreux. On constate un forte pompage vers l'extérieur de la chaux et la précipitation de l'hydroxyde de calcium en surface des bétons. Des efflorescences secondaires sont dues à un apport d'eau extérieur et apparaissant plus tardivement, essentiellement en cours de stockage et dépendent des conditions de traitement et de conservation de la partie d'ouvrage (Eiffage, b) (Lallement, 2001) (Geoffray, 1991).

## *Traces de rouille*

Les traces de rouille sur le béton sont des taches d'hydroxyde ou d'oxyde de fer provenant de l'oxydation de matériaux contenant du fer. Elles peuvent avoir plusieurs causes ; un moule d'armature trop oxydé (Figure C.10), un défaut d'enrobage des armatures ou les fibres métalliques présentes dans le béton (Geoffray, 1991). Ou parfois de granulats contenant des sulfures de fer (pyrite) qui s'oxydent à l'air (CERIB, 2007).



FIGURE C.9 – Efflorescences dans les bétons (Blasting, 2018)

Pour prévenir, éviter l'emploi de granulats contenant des pyrites, utiliser des moules métalliques propres, éliminer la présence de rouille dans les moules, appliquer sur les moules une huile de démoulage adaptée et ne pas employer des armatures rouillées (Lallement, 2001).



FIGURE C.10 – Traces de rouille sur une surface de béton  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$

### *Taches noires*

Les taches noires sont des zones très sombres de forme irrégulière, plus ou moins visibles selon l'intensité du contraste (Figure C.11). Ces taches peuvent être dues à un enrichissement local superficiel en clinker, qui semblent avoir une pâte de ciment très compacte, sans aucun pore. Les causes probables peuvent être la ségrégation de la fraction la plus fine des composants du béton et la mauvaise vibration ou la post vibration du béton pendant sa phase de durcissement (Geoffray, 1991).

Pour éviter les taches noires, on doit prévenir la ségrégation au sein de la fraction fine avec un mélange du béton très stable, éviter la revibration des couches après 1 à 3 heures, choisir des vibrateurs en fonction du béton et du coffrage, éviter des coffrages très rigides (résonance lors de la vibration).



FIGURE C.11 – Taches noires sur la surface de béton (Geoffray, 1991)

# Annexe D

## Matériau cimentaire

### D.1 Introduction

Un matériau cimentaire correspond à n'importe quel mélange contenant du ciment. La forme la plus simple d'un matériau cimentaire est la **pâte de ciment**, constituée uniquement de ciment et d'eau. Les principaux types de matériaux cimentaires connus sont :

1. Pâte de ciment : Mélange de ciment et d'eau ;
2. Mortier : Mélange de ciment de sable et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions ;
3. Béton : Matériau de construction formé par un mélange de ciment, de granulats et d'eau, éventuellement complété par des adjuvants et des additions, et dont le propriétés se développent par hydratation du ciment[NF EN 206-1/CN].

### D.2 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique (liant qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau), c'est-à-dire un matériau minéral finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [NF EN 197-1].

Les ciments courants bénéficient d'un double marquage :

1. **CE** : signifie que les produits sont conformes aux réglementations européennes en matière de santé, de sécurité et de respect de l'environnement, et sont donc réglementairement aptes à l'usage ;
2. **NF** : associée au marquage CE, signifie que les produits bénéficient de garanties complémentaires sur leur composition, leurs performances et leur contrôle selon les normes françaises.

### D.3 Type de ciments

Les ciments sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants, et selon la norme NF EN 197-1 Tableau [D.1](#).

Les lettres A, B et C donnent une information sur la proportion de constituants autres que le clinker.

| Type de ciment            | Nomenclature        |
|---------------------------|---------------------|
| Ciments Portland          | CEM I               |
| Ciments Portland composés | CEM II / A ou B     |
| Ciments de haut-fourneau  | CEM III / A, B ou C |
| Ciments pouzzolaniques    | CEM IV / A ou B     |
| Ciments composés          | CEM V / A ou B      |

TABLE D.1 – Types de ciments

| Nom                  | Oxydes                         | Nomenclature | Teneur (%) |
|----------------------|--------------------------------|--------------|------------|
| Chaux                | CaO                            | C            | 60-67      |
| Silice               | SiO <sub>2</sub>               | S            | 17-25      |
| Alumine              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | A            | 3-8        |
| Oxyde de Fer         | Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | F            | 0.5-6.0    |
| Anhydride sulfurique | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | S            | 2.0-3.5    |
| Oxyde de Magnésium   | MgO                            | M            | 0.5-4.0    |
| Oxyde de sodium      | Na <sub>2</sub> O              | N            | 0.3-1.2    |

TABLE D.2 – Composition chimique du ciment portland (Neville, 2000)

## D.4 Constituants du ciment

Pour simplifier l'écriture, des composants des ciments sont utilisés les lettres simples. Les notations sont résumées dans le Tableau D.2. Les constituants principaux des ciments sont :

### *Clinker*

La production de clinker est un processus industriel énergivore et très émetteur de gaz à effet de serre (GES). L'industrie du ciment est responsable d'environ 5 % des émissions de dioxyde de carbone et émet près de 900 kg de CO<sub>2</sub> pour 1000 kg de ciment produit (Mahasenan et al., 2003). En effet, on chauffe à 1450 °C un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%). Lors de la chauffe, le calcaire se décarbonate, libérant ainsi du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (équivalent à 44% de la masse de calcaire introduite, Équation D.1). Suite à cette décarbonatation, les minéraux se réarrangent au sein du cru pour former du clinker, constitué des quatre phases principales décrites par (Bogue, 1952), Alite (C<sub>3</sub>S), Belite (C<sub>2</sub>S), ainsi que deux phases métalliques, (C<sub>3</sub>A) et (C<sub>4</sub>AF).



Les quatre phases solides principales du clinker sont présentés dans le Tableau D.3

| Nom                           | Formule   | Notation          | Proportion masse |
|-------------------------------|---|-------------------|------------------|
| Silicate bicalcique           | 2 CaO · SiO <sub>2</sub>  | C <sub>2</sub> S  | 50-60 %          |
| Silicate tricalcique          | 3 CaO · SiO <sub>2</sub>  | C <sub>3</sub> S  | 20-25 %          |
| Aluminate tricalcique         | 3 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                  | C <sub>3</sub> A  | 6-10 %           |
| Alumino-ferrite tétracalcique | 4 CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> AF | 6-10 %           |

TABLE D.3 – Principales phases du clinker (Aïtcin, 2016)

Selon Bogue (Taylor, 1997), la composition minéralogique et le pourcentage des principaux composés du ciment Portland sont donnés par les équations suivant :



$$C_2S = 2.8675SiO_2 - 0.7544C_3S \quad (D.3)$$

$$C_3A = 2.6504Al_2O_3 - 1.6920Fe_2O_3 \quad (D.4)$$

$$C_4AF = 3.0432Fe_2O_3 \quad (D.5)$$

### *Laitier granulé de haut fourneau*

Le laitier granulé de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu de composition adaptée provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

### *Matériaux pouzzolaniques*

Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci.

### *Cendres volantes*

Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérisées contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé. Les cendres volantes peuvent être de nature siliceuse ou calcique. Les premières ont des propriétés pouzzolaniques ; les dernières peuvent avoir, en plus, des propriétés hydrauliques.

### *Schiste calciné*

Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four spécial à une température d'environ 800 °C. En raison de la composition des matériaux naturels et du procédé de production, le schiste calciné contient des phases du clinker, principalement du silicate bicalcique et de l'aluminate monocalcique. Il contient également, outre de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, des quantités plus importantes d'oxydes réagissant de façon pouzzolanique, notamment de dioxyde de silice. En conséquence, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques, comme le ciment Portland.

### *Fumée de silice*

La fumée de silice provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium ; elle est formée de particules sphériques très fines contenant au moins 85 % en masse de dioxyde de silice amorphe. La teneur en silicium élémentaire, si, déterminée conformément à l'ISO 9286, ne doit pas être supérieure à 0,4 % en masse.

### *Calcaire*

La teneur en carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) calculée à partir de la teneur d'oxyde de calcium doit être supérieure ou égale à 75 % en masse.

## D.5 Granulats

Les granulats sont de matériaux granulaires inertes qui, agglomérés par un liant, constituent le squelette du béton. Cela signifie que les granulats ne réagissent pas avec le liant et ne participent à la résistance du béton que par la compacité qu'ils confèrent à celui-ci (produit de remplissage) (Baron and Sauterey, 1982). Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux compris entre 0 et 125 mm de diamètre et classés en 7 familles [Tableau D.4]. Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. (CIMbeton, 2005b) :

| Familles   | Dimensions | Unité |
|------------|------------|-------|
| Fillers    | 0/2        | mm    |
| Sables     | 0/4        | mm    |
| Graves     | 0/6.3      | mm    |
| Gravillons | 2/63       | mm    |
| Ballast    | 31.5/63    | mm    |

TABLE D.4 – Granulats les plus utilisés

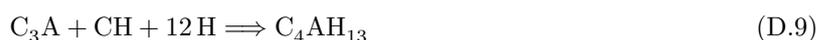
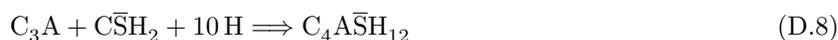
## D.6 Les adjuvants

Les adjuvants sont incorporés au moment du malaxage du béton à une dosage  $\leq$  à 5 % en masse de la teneur en eau, et ils sont classés selon la norme NF EN 934-2+A1 :

- Plastifiant et superficiel : Adjuvant qui réduit la teneur en eau, sans modifier la consistance ;
- Rétenteur d'eau, qui réduit la perte d'eau en diminuant le ressuage ;
- Adjuvant entraîneur d'air, qui permet d'incorporer une quantité contrôlée de fines bulles d'air uniformément réparties et qui subsistent après durcissement.
- Accélérateur et retardateur de prise, qui diminue ou augmente le temps de début de transition du mélange de l'état plastique à l'état rigide.
- Accélérateur de durcissement, qui augmente la vitesse des résistances initiales du béton, avec ou sans modification de temps de prise.
- Hydrofuge de masse, qui réduit l'absorption capillaire du béton durci, etc.

## D.7 Hydratation du ciment

Le terme "*hydratation*" désigne l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent quand le ciment anhydre se trouve en contact avec de l'eau. Les principaux hydrates formés par réaction entre l'eau et les constituants du ciment sont : Les silicates de calcium hydratés (**CSH**), la portlandite (**CH**), l'ettringite (**AFt**) et le monosulfoaluminate de calcium hydraté (**AFm**). Les principales réactions d'hydratation des ciments sont résumées dans la liste suivante (Papadakis et al., 1991) :





Avec :

|                    |  |                               |
|--------------------|--|-------------------------------|
| $\overline{C}SH_2$ | : $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$                              | Gypse                         |
| CH                 | : $Ca(OH)_2$   | Portlandite                   |
| CSH                | : $3 CaO \cdot 2 SiO_2 \cdot 3 H_2O$                 | Silicate de calcium hydraté   |
| $C_4AS_3H_{32}$    | : $3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$ | Ettringite                    |
| $C_4ASH_{12}$      | : $3 CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3 CaSO_4 \cdot 32 H_2O$ | Monosulfoaluminate de calcium |

## D.8 Définitions [NF EN 206-1/CN]

- Gâchée : quantité de béton frais produite en un seul cycle par un malaxeur discontinu, ou quantité déversée pendant 1 minute d'un malaxeur continu.
- Adjuvant : produit ajouté au béton durant le processus de mélange, en petites quantités par rapport à la masse de ciment, pour modifier les propriétés du béton frais ou durci.
- Addition : matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Nous avons les additions quasiment inertes (type I) et à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (type II).
- Granulat : matériau minéral granulaire apte à être utilisé dans du béton. Les granulats peuvent être naturels, artificiels, ou recyclés à partir de matériaux précédemment utilisés en construction.
- Teneur en eau totale : l'eau d'apport plus l'eau déjà contenue dans et à la surface des granulats plus l'eau des adjuvants et des additions utilisées sous la forme de suspension et toute eau résultant de l'ajout de glace ou de chauffage à la vapeur.
- Teneur en eau efficace : différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats.
- Rapport eau/ciment (E/C) : rapport en masse de la teneur en eau efficace à la teneur en ciment dans le béton frais.
- Air entraîné : bulles d'air microscopiques intentionnellement incorporées au béton lors du malaxage, habituellement par l'utilisation d'agents tensioactifs ; les bulles sont pratiquement sphériques et leur diamètre est généralement compris entre 10  $\mu m$  et 300  $\mu m$ .
- Air occlus : vides d'air dans le béton qui ne sont pas intentionnellement créés.

# Annexe E

## Rhéologie

### *Définition*

Rhéologie est un mot créé aux États Unis le 29 Avril 1929 par Eugène Cook Bingham (1878-1945). Bingham voulait créer une branche de la physique qui traite spécifiquement des problèmes relatifs aux liquides et solides inhabituels, avec le terme "rheo" pris du grec, signifiant "tout coule" et "-ologie" signifiant "l'étude de". La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement et la déformation des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées en tenant compte de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps. La rhéologie s'intéresse au comportement des matériaux et est définie comme : "La science de la déformation et du flux de la matière". L'émergence de la rhéologie est liée à la construction des premiers rhéomètres (Doraiswamy, 2002).

La rhéologie est utilisée dans plusieurs domaines : tel que l'étude d'écoulement du sang (Connesa et al., 2016), dans les matériaux cimentaires (Banfill, 2006) (Susan Msinjilia et al., 2017), dans les aliments (Caroline E. Wagner, 2017), dans les polymères (U.Šebenik, 2017). La rhéologie unit des champs d'application apparemment sans rapport, les matériaux plastiques et les fluides non newtoniens, en supposant que les deux types de matériaux sont incapables de supporter une contrainte de cisaillement en équilibre statique, ce qui fait du solide plastique un fluide. L'écoulement rhéologique peut s'exprimer en contrainte de cisaillement  $\tau$  et en taux de cisaillement  $\dot{\gamma}(h)$ . La contrainte de cisaillement est la force que subit le matériau par unité de surface et appliquée de manière tangentielle à une face d'un matériau, par opposition aux contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire. Elle possède une dimension d'une pression, exprimée en pascals  $Pa$  et peut être décrite par :

$$\tau[Pa] = \frac{F[N]}{S[m^2]} \quad (E.1)$$

Si on considère un fluide comme un ensemble de couches moléculaires parallèles emprisonnées entre deux plans parallèle de surface  $S$  séparés d'une distance  $h$ . Un des plans est fixe, et le second est déplacé d'une distance  $du$  à une vitesse constante de norme  $V$ . Sous l'effet de la force tangentielle, la première couche moléculaire se déplace à la même vitesse que la paroi. Les couches inférieures vont se mouvoir dans la même direction mais avec des vitesses de plus en plus petites. Ils se crée un gradient de vitesse entre les deux plans. Le taux ou la vitesse de déformation  $\dot{\gamma}(h)$ , représente la variation du déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une autre.

Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation déterminée par la relation suivante :

$$\gamma = \frac{u}{h} \quad (E.2)$$

Où  $u$  est le déplacement et la hauteur de la zone cisailée  $h$ . La vitesse maximale est :

$$V_{max} = \frac{du}{dt} \quad (E.3)$$

La vitesse de déformation  $\dot{\gamma}(h)$ , est la vitesse 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, il

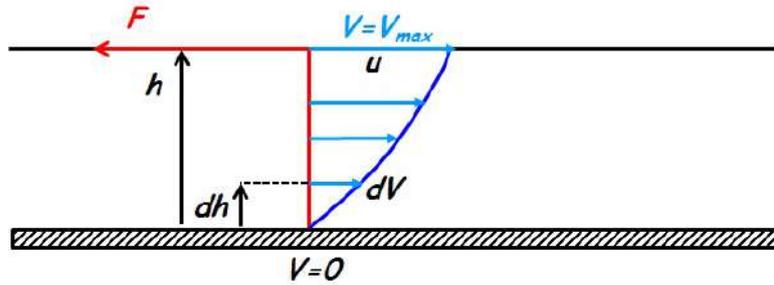


FIGURE E.1 – Écoulement d'un fluide en régime laminaire

est défini comme :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{h} \cdot \frac{du}{dt} = \frac{V_{max}}{h} \quad (\text{E.4})$$

Si on considère idéalement un fluide comme un ensemble de couches moléculaires parallèles. Soumise à une contrainte tangentielle, une couche du fluide se déplace par rapport à celle qui lui est adjacente. En raison des frottements permanents sur les molécules de la seconde couche, le mouvement n'est transmis que partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-adjacente sur celle de la couche supérieure est appelé viscosité ( $\mu$ ). La viscosité représente la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Pour un écoulement laminaire d'un fluide newtonien, la viscosité dynamique est le rapport de la contrainte de cisaillement au gradient de vitesse perpendiculaire au plan de cisaillement.

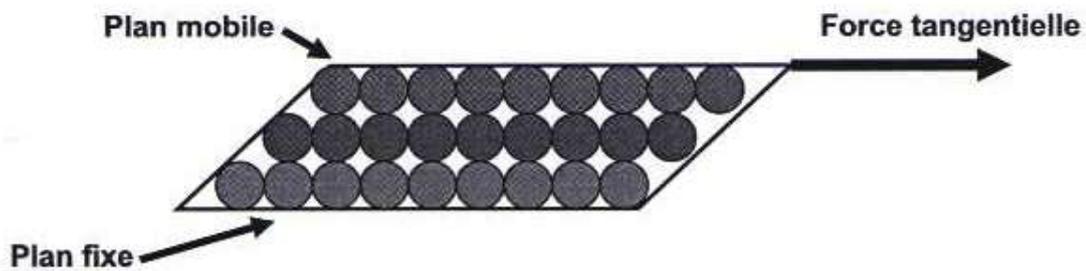


FIGURE E.2 – Schéma de glissement des couches

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{E.5})$$

De nombreux matériaux industriels ou naturels ont un caractère double, c'est-à-dire qu'ils se comportent comme des solides dans certaines circonstances et comme des liquides dans d'autres circonstances. En fait, ces matériaux se comportent comme des solides lorsqu'une contrainte inférieure à une valeur critique est appliquée (seuil), de sorte qu'ils peuvent conserver la forme qui leur a été donnée (Roussel, 2012).

Le seuil de cisaillement ( $\tau_0$ ) est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous du seuil le fluide se comporte comme un solide viscoélastique (pas de déformation permanentes) et au-dessus de ce seuil, il se comporte comme un fluide. Le seuil d'écoulement n'est pas une constante du matériau. Cette valeur dépend des conditions de mesures et de la méthode d'analyse utilisée. Pour obtenir le seuil, nous pouvons introduire le concept de seuil statique et dynamique (D, 1986). Le seuil statique correspond à la contrainte à fournir afin d'obtenir le premier signe d'écoulement qui peut être déterminé en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant l'écoulement de la suspension. Le seuil de cisaillement dynamique peut être déterminé en appliquant un gradient de vitesse suffisamment élevé. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. Par conséquent, la valeur du seuil de cisaillement statique est supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière lorsque l'écoulement de la matière cisailée. Selon la littérature, le seuil de cisaillement et la viscosité varient en fonction du type des matériaux cimentaires .

# Annexe F

## Vibration du béton

### F.1 Rôle de la vibration

La vibration appliquée au béton frais favorise l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton. La mise en place est facilitée : remplissage des moules, enrobage des armatures. Le béton obtenu présente une compacité plus forte, avec moins de vides d'air (effets de serrage). Soumis à la vibration, le béton se comporte comme un corps plastique dont l'abaissement du seuil de cisaillement facilite l'écoulement (Infociments, 2016).

Les paramètres de la vibration sont : l'énergie transmise au béton par le vibreur, la fréquence optimale variant en fonction de la taille des granulats, l'amplitude et la durée de vibration.

Les matériels de vibration se répartissent en deux catégories : ceux qui fournissent une vibration interne au béton (pervibration) et ceux qui apportent une vibration externe.

### F.2 Distance entre vibreurs

Dans le cas de vibration interne, une aiguille vibrante possède un rayon d'action ou un diamètre d'action. Le rayon d'action de l'aiguille dépend de ses caractéristiques mécaniques et des propriétés du béton. Plusieurs auteurs tels que Geoffroy, Forssblad et (CIMbéton, ) proposent une estimation de 10 fois le diamètre de l'aiguille vibrante entre 200 Hz à 300 Hz. Ainsi, Banfill (Équation F.1) et (Grampeix, 2013) (Équation F.2) proposent une formule pour prédire le rayon d'action des pervibrateurs :

$$D = D_0 \sqrt{\frac{\tau_0 + \mu_p \gamma(\dot{D})}{\tau_0}} \quad (\text{F.1})$$

$$D = D_0 \sqrt{1 + \frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k \cdot f \cdot a}{R_0}} \quad (\text{F.2})$$

Où  $D$  est le diamètre d'action maximal de l'aiguille ( $m$ ),  $D_0$  est le diamètre extérieur de l'aiguille ( $m$ ),  $\tau_0$  est le seuil au repos du matériau ( $Pa$ ),  $\mu_p$  est la viscosité plastique ( $Pa \cdot s$ ),  $\dot{\gamma}$  est le gradient de vitesse ( $s^{-1}$ ),  $f$  est la fréquence de l'aiguille ( $s^{-1}$ ),  $a$  est l'amplitude de l'aiguille ( $m$ ) et  $k$  est un coefficient sans dimension lié à la géométrie du gradient de vitesse.

Pour une vibration efficace, (CIMbéton, ) propose une formule simple Équation F.3 pour calculer la distance entre deux points de vibration  $e$  :

$$e \approx 1.7 * \frac{D_0}{2} \quad (\text{F.3})$$

Ex : Pour une aiguille de 25 mm, on aura 25 cm de diamètre d'action, et une distance maximale de 21,25 cm entre deux points pour une vibration efficace.

## F.3 Temps idéal de vibration

C'est le temps minimal pour assurer la mise en place du béton dans le coffrage et le temps maximal pour éviter la ségrégation. Le temps nécessaire où l'aiguille est laissée au même emplacement selon le type de béton est selon (CIMbeton, 2013) de :

- 5 secondes pour les bétons mous ;
- 20 secondes pour les bétons plastiques ;
- 60 secondes pour les bétons fermes.

Selon (Grampeix, 2013) et (Martin, 2007) la vibration se décompose en deux étapes :

1. **Temps de consolidation ou compaction**  $T_{C1}$  : A partir de la rhéologie du béton le temps de remplissage peut être :

$$T = \frac{\mu_p}{\tau} \quad (\text{F.4})$$

$$T_{C1} = \frac{\mu_p}{\rho \cdot g \cdot D_M} \quad (\text{F.5})$$

Où  $\mu_p$  est la viscosité plastique du matériau ( $Pa \cdot s$ ),  $g$  est la pesanteur ( $m \cdot s^{-2}$ ),  $D_M$  est le diamètre moyen de défauts sans vibration ( $m$ ) et  $\rho$  est la masse volumique du matériau ( $Kg/m^3$ )

2. **Temps de remonter de bulles**  $T_{C2}$  : Vibration qui permet d'évacuer les bulles d'air vers la surface du béton.

$$T_{C2} = \frac{\mu_p}{\rho \cdot g \cdot D_A} \quad (\text{F.6})$$

Où  $D_A$  est le diamètre moyen de bulles d'air ( $m$ ).

## F.4 Zone de vibration efficace

La zone efficace de vibration d'un matériau cimentaire est liée à l'amplitude communiquée aux grains par la source, elle doit être suffisamment grande pour diminuer les forces de liaison entre grains, et entraîner ainsi une meilleure fluidité. Lassalle (Lassalle and Legrand, 1980b) (Lassalle and Legrand, 1980a) à étudier l'évolution de la rhéologie d'une pâte de ciment fraîche de E/C 0,58, suivant la distance à une source vibrante Figure F.1. Il a déterminé aussi, la zone de vibration efficace de la pâte de ciment en fonction de la puissance et la fréquence Figure F.2 Figure F.3.

La recherche d'une vibration efficace joue en fonction de la puissance et de la fréquence. Pour une puissance constante, la fréquence doit être suffisamment élevée pour que la vibration se propage le plus loin possible, et suffisamment faible pour éviter des turbulences au voisinage de la source. L'augmentation de la fréquence correspond à une diminution de l'amplitude.

A partir des ces résultats, on peut distinguer une première zone de turbulence néfaste à la qualité du béton durci au voisinage du vibreur. Une zone de vibration efficace avec ses limites d'agitation et de mobilité, la position de ces limites dépend de l'amplitude et la fréquence. Et finalement, une zone non vibrée à l'extérieur.

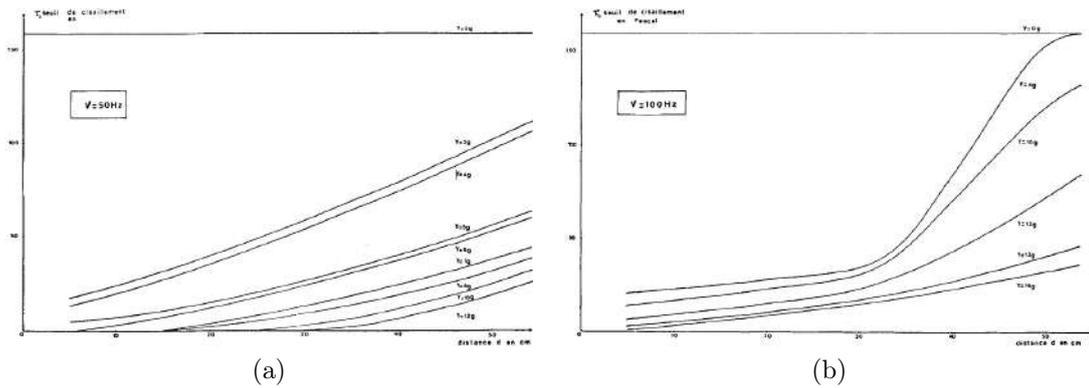


FIGURE F.1 – Variation du seuil de cisailment de la pâte de ciment en fonction de la distance pour : (a) 50 Hz et (b) 100 Hz

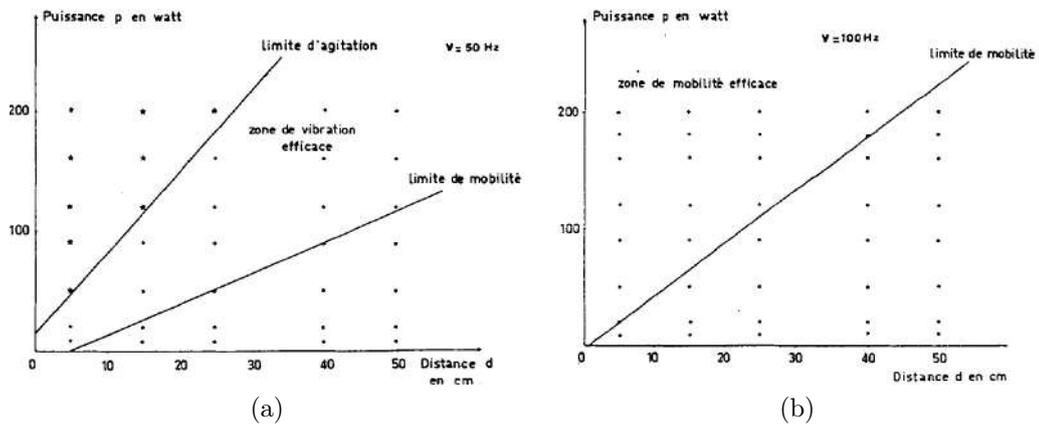


FIGURE F.2 – Zone de vibration efficace pour une fréquence de : (a) 50 Hz et (b) 100 Hz

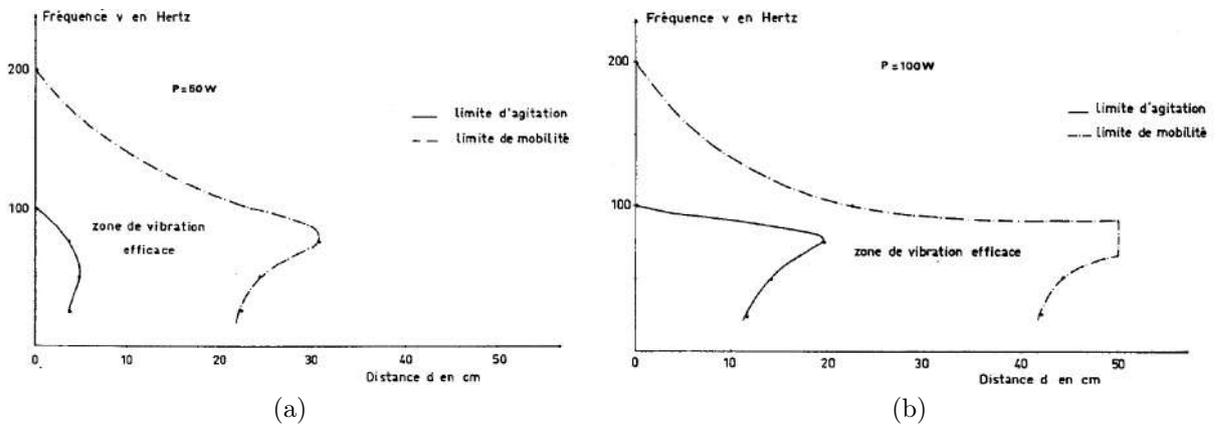


FIGURE F.3 – Zone de vibration efficace en fonction de la fréquence à une puissance de : (a) 50 W et (b) 100 W

# Annexe G

## Essais préliminaires

### G.1 Études des défauts de surface des parements bruts du béton

#### *Objectif*

Identifier les différents types de défauts de surfaces dans les parements du béton brut.

#### *Essais réalisés*

Nous avons fabriqué deux parement de béton. Les bétons ont été préparés en laboratoire en utilisant un malaxeur. Les bétons ainsi préparés, sont immédiatement coulés dans les moules en bois bakélinisé de 18x30x60  $cm^3$ . L'agent démoulant est l'émulsion d'huile de synthèse "CHRYSO Dem Aqua 80 - DES". Les bétons sont coulés en deux couches et compactés par vibration avec l'utilisation d'une aiguille vibrante. La formulation des bétons est détaillée dans le Tableau G.1.

| Matériaux         | $Kg/m^3$ |
|-------------------|----------|
| Gravillon 5/20    | 861      |
| Sable 0/4         | 679      |
| Sablon 0/1        | 99       |
| CEM I             | 330      |
| Eau               | 170      |
| Addition Calcaire | 70       |
| Adjuvant          | 3.2      |

TABLE G.1 – Composition des bétons

#### *Observations*

D'après la Figure G.1 à l'œil nu, nous observons de nombreux défauts de surface dans les parements du béton brut. Ces défauts sont dus à la variation de la texture et à la teinte. Les défauts que nous pouvons observer sont principalement des pores de surface et des différences de teinte. Nous détaillerons ci-dessous quelques défauts présents à la surface du béton.

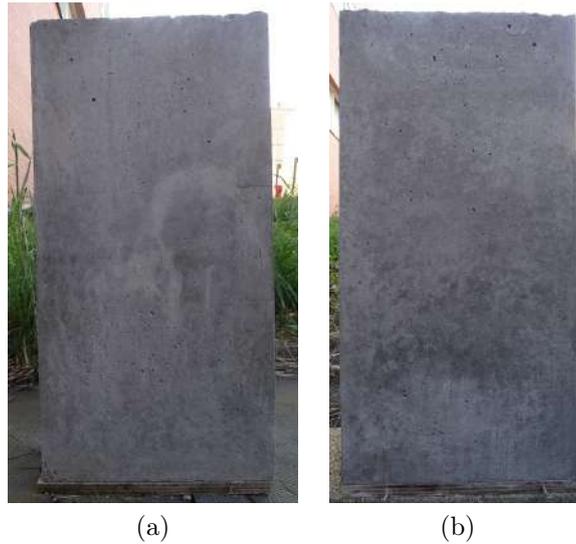


FIGURE G.1 – Parements bruts de bétons fabriqués au laboratoire

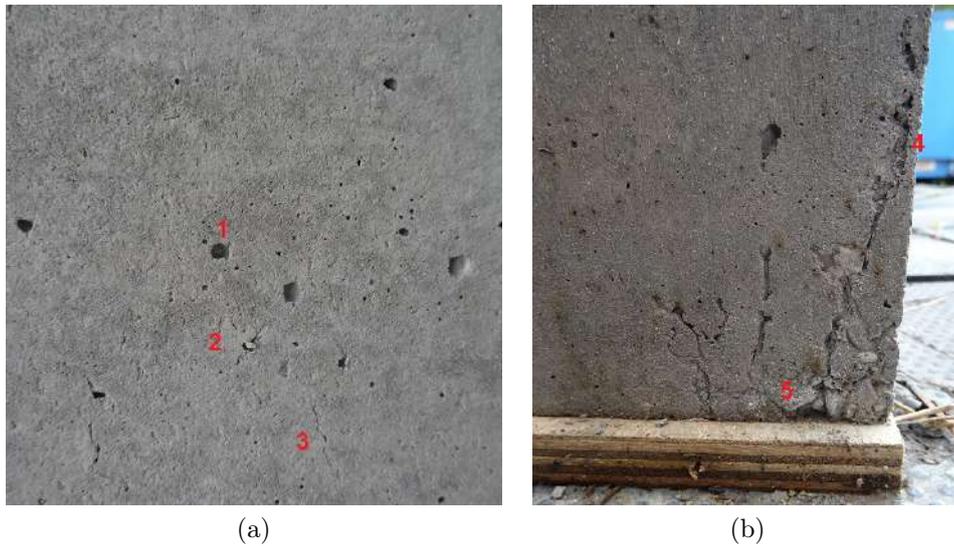


FIGURE G.2 – Défauts de surfaces dans les bétons liés à la texture de Parements bruts : (a)1 bullage, (a)2 écaillage, (a)3 faîençage, (b)4 nid du sable et (b)5 vide de compaction

De nos bétons, nous avons observé des défauts de surface liés à la texture et à la variation de la teinte. Nous avons observé de bullage, de nid de sable, de vide de compactage, de taches noires et de sécrétion de la chaux. Tous ces défauts pourraient être dus à la mauvaise mise en œuvre du béton. Comme nous pouvons l'observer, dans la partie inférieure du béton, nous observons des vides de compactage provoqués par la mauvaise vibration du béton.

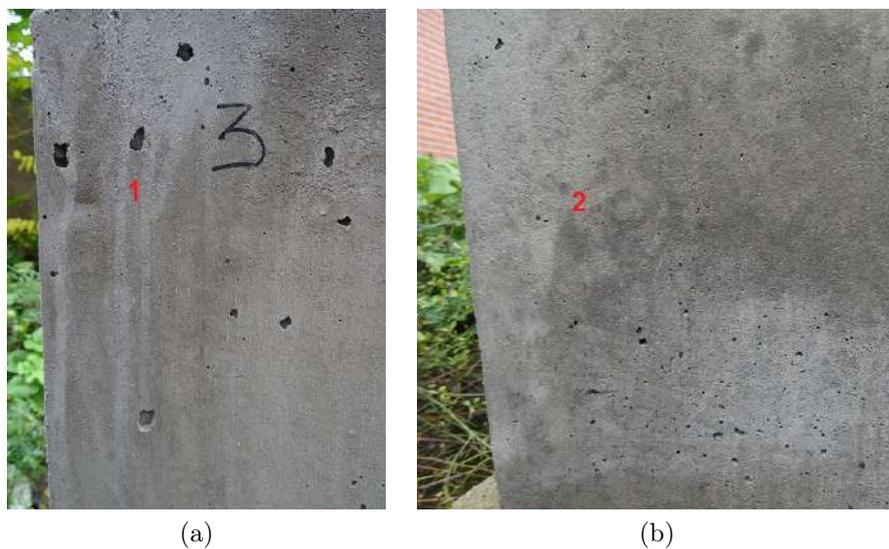


FIGURE G.3 – Défauts de surfaces dans les bétons liés à la variation de la teinte : (a)1 sécrétion de chaux (b)2 taches noires

## G.2 Variation du rapport E/C sur deux couches

### Objectif

L'objectif de cet essai est de déterminer l'effet de la variation de couleur par rapport au rapport E/C.

### Essais réalisés

Dans cet essai, nous avons réalisé des échantillons de pâtes et de mortiers en 2 couches selon le Tableau G.2. Le rapport E/C des mélanges sera de 0,45 et 0,55. La première couche sera remplie avec le mélange du rapport E/C de 0,45 et la seconde couche sera remplie avec le mélange du rapport E/C 0,55. Les moules utilisés seront des moules métalliques de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ .

| Pâte de ciment | Mortier |
|----------------|---------|
| 0.55           | 0.55    |
| 0.45           | 0.45    |

TABLE G.2 – Variation du rapport E/C des pâtes et des mortiers

### Observations



FIGURE G.4 – Variation de la couleur des pâtes en fonction du rapport E/C dans un même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage

D'après la Figure G.4 nous pouvons observer pour les pâtes :

- Au premier jour, une différence de couleur entre les deux couches a été observée. On note également, la couche inférieure apparaît toujours plus humide que la couche supérieure. La couche supérieure (E/C=0.55) paraît plus claire que la couche inférieure (E/C=0.45).
- Après 40 jours, la différence de couleur devient moins identifiable entre les deux couches. Il semble dans un certain cas, que la couche inférieure continue à être plus sombre.

D'après la Figure G.5 nous pouvons observer pour les mortiers :

- Au premier jour, une différence de couleur entre les deux couches des mortiers a été observée. La couche supérieure (E/C=0.55) est plus claire que la couche inférieure (E/C=0.45). La couche inférieure est très humide.



FIGURE G.5 – Variation de la couleur des mortiers en fonction du rapport E/C dans un même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage

— Après 40 jours, la différence de couleur devient moins identifiable entre les deux couches. Il semble dans un certain cas, que la couche inférieure continue à être plus sombre.

De nos résultats, nous avons observé que le premier jour de démoulage, les pâtes et les mortiers ont la couche inférieure humide et est plus sombre. Cela en raison de l'humidité présente dans les parois des échantillons. Après 40 jours après de démoulage, la différence de couleur des deux couches est quasi imperceptible. On peut voir que dans certains échantillons, la couche inférieure reste plus sombre que la couche supérieure.

## G.3 Effet de temps d'attente entre 2 levées

### Objectif

L'objectif de cet essai est de déterminer l'effet de la variation de couleur par rapport au temps d'attente entre levées dans un même échantillon.

### Essais réalisés

Dans cet essai, nous avons réalisé des échantillons de pâtes et de mortiers en 2 couches. Le rapport E/C des mélanges sont de 0.50. Nous avons rempli la première couche. Une fois rempli, nous avons attendu 1 heure. Ensuite, nous remplissons la deuxième couche. Les moules utilisés sont des moules métalliques de  $4 * 4 * 16\text{cm}^3$ .

### Observations

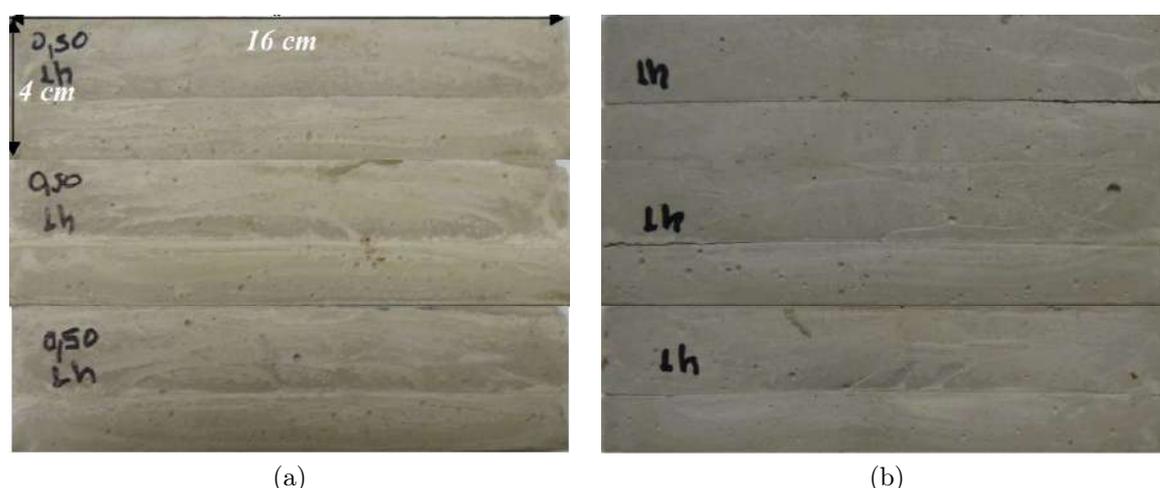


FIGURE G.6 – Variation de la couleur des pâtes en fonction du temps d'attente dans une même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage

D'après la Figure G.6 nous pouvons observer pour les pâtes :

- Au premier jour, une différence de couleur entre les deux couches a été observée. La couche supérieure paraît plus claire que la couche inférieure. Cela est dû à l'humidité présente dans la paroi de l'échantillon.
- Après 40 jours, la différence de couleur devient quasi difficile à déterminer. Nous ne pouvons pas observer une nette différence de couleurs entre les deux couches. Cependant, nous pouvons voir une ligne de démarcation qui indique la séparation entre les deux couches.

D'après la Figure G.7 nous pouvons observer pour les mortiers :

- Au premier jour, une différence de couleur entre les deux couches a été observée. La couche supérieure est plus claire que la couche inférieure. Cela est dû à l'humidité présente dans la paroi de l'échantillon.
- Après 40 jours, la différence de couleur devient quasi difficile à déterminer. Nous ne pouvons pas observer une nette différence de couleurs entre les deux couches.

De nos résultats, nous avons observé que le premier jour de démoulage, les pâtes et les mortiers ont la couche inférieure humide et plus sombre. 40 jours après de démoulage, la différence de couleurs des deux couches est imperceptible. Dans certains échantillons, tels que les pâtes, nous pouvons voir une ligne de division qui indique la séparation entre les deux couches.

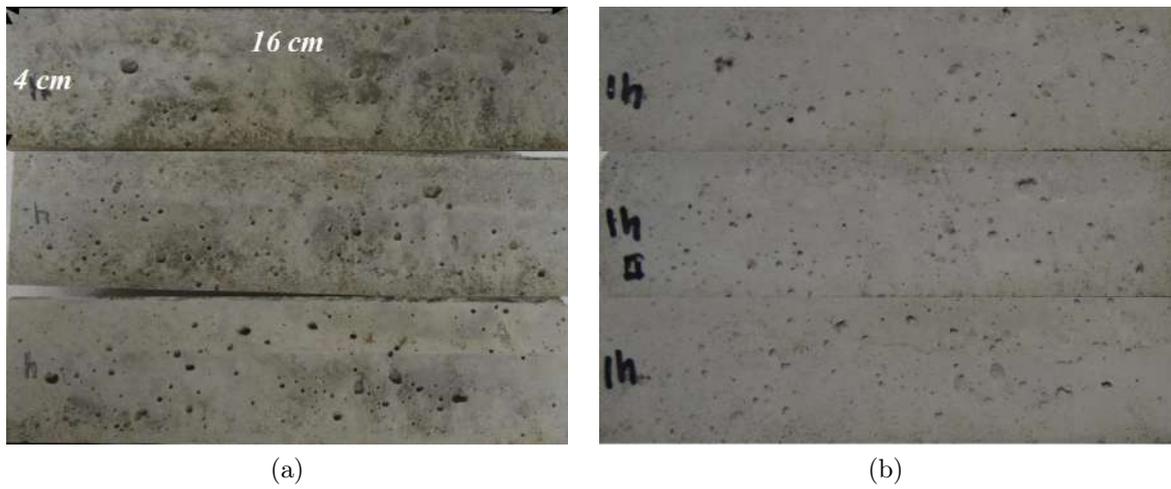


FIGURE G.7 – Variation de la couleur des mortiers en fonction du temps d'attente dans une même échantillon : (a) Premier jour après démoulage et (b) 40 jours après démoulage

## G.4 Temps de vibration optimal pour les bétons

### *Objectif*

L'objectif de ces essais est de déterminer le temps de vibration optimal dans les bétons.

### *Essais réalisés*

Pour cet essai, nous avons fait des échantillons des bétons en 2 couches. Le rapport E/C des bétons seront de 0.43. Le temps de vibration varie selon la séquence suivante : 10, 15, 30, 45, 60, 90 et 120 secondes. Les moules utilisés sont des moules cylindriques de dimension de 16cm de diamètre et 32cm de hauteur. La composition du béton est détaillée dans le tableau suivant :

| Matériaux      | Quantité ( $Kg/m^3$ ) |
|----------------|-----------------------|
| Gravillon 5/20 | 1120                  |
| Sable 0/4      | 655                   |
| Ciment CEM 1   | 400                   |
| Eau            | 170                   |
| Adjuvant       | 1.2 $l/m^3$           |

TABLE G.3 – Composition des bétons

### *Observations*



FIGURE G.8 – Variation de la surface des bétons en fonction du temps de vibration

D'après la Figure G.8 nous pouvons noter quelques observations concernant l'aspect de la surface :

- L'aspect de la surface du béton est déterminée par le temps de vibration. Par exemple, plus le temps de vibration est court ( $\approx 5$  secondes), est plus l'aspect est médiocre avec la présence de gros pores de surface. Plus le temps de vibration est long ( $\approx 120$  secondes) et plus l'aspect est relativement meilleur avec la présence de petits pores de surface.
- Selon nos observations, nous avons déterminé que le temps optimal pour notre échantillon est de 45 secondes. En dessous de ce temps, l'échantillon aura de gros pores. Au-dessus de ce temps, de petits pores commencent à apparaître dans l'échantillon.

D'après nos observations, nous avons pu déterminer que le temps optimal pour obtenir un bon parement du béton est de 45 secondes selon notre formulation.

## G.5 Effet de la quantité de l'huile de décoffrage sur la teinte

### *Objectif*

L'objectif de cet essai est de déterminer l'effet de la quantité de l'huile de démoulage sur la variation de couleur des surfaces des pâtes de ciment et des mortiers.

### *Essais réalisés*

Dans cet essai, nous avons réalisé des échantillons de pâtes et de mortiers en 2 couches. Le rapport E/C des matériaux est de 0.35 pour les pâtes et 0.45 pour les mortiers. Les moules utilisés sont des moules métalliques de  $4 * 4 * 16\text{cm}^3$ . Le remplissage des mélanges se fait en deux couches. Le compactage est fait avec une table à chocs. La quantité d'huile sera déterminée par la façon de huiler les moules. Certains moules étaient huilés avec une fine couche d'huile avec du papier d'essuyage. Les autres moules étaient huilés avec une brosse, engendrant une couche épaisse d'huile.

### *Observations*

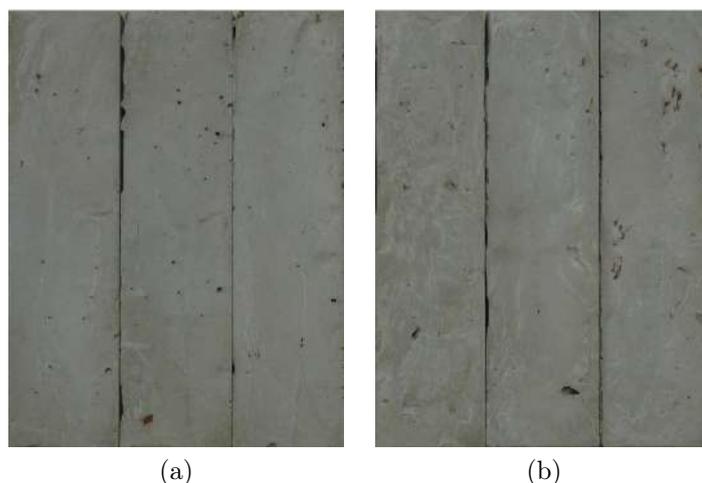


FIGURE G.9 – Variation de la couleur des pâtes en fonction de la quantité de huile de démoulage : (a) Huilé avec de papier d'essuyage et (b) huilé avec une brosse

D'après la Figure G.9 et la Figure G.10 nous pouvons observer :

- À première vue, il est difficile d'identifier quel échantillon est plus sombre ou plus clair (entre mélanges coulés dans une moule huilée avec une couche mince et une couche épaisse) .
- Les échantillons coulés dans une moule huilée avec excès d'huile présentent une couleur hétérogène para rapport aux échantillons coulés dans une moule huilée avec du papier, qui semble avoir une couleur bien homogène.
- Les échantillons obtenues dans une moule avec excès d'huile ont la surface plus rugueuses dans les pâtes et avec des gros pores de surfaces dans les mortiers.

Selon nos observations, nous avons pu déterminer l'influence de la quantité d'huile dans les moules sur l'aspect final des échantillons. Premièrement, la couleur ne varie pas beaucoup par rapport à la quantité d'huile utilisée. Deuxièmement, l'hétérogénéité de la couleur de surface est très perceptible dans les échantillons qui ont été fabriqués avec un excès d'huile. Enfin, l'excès d'huile dans les pâtes et les mortiers génère respectivement beaucoup de rugosité et de nombreux pores de surface.

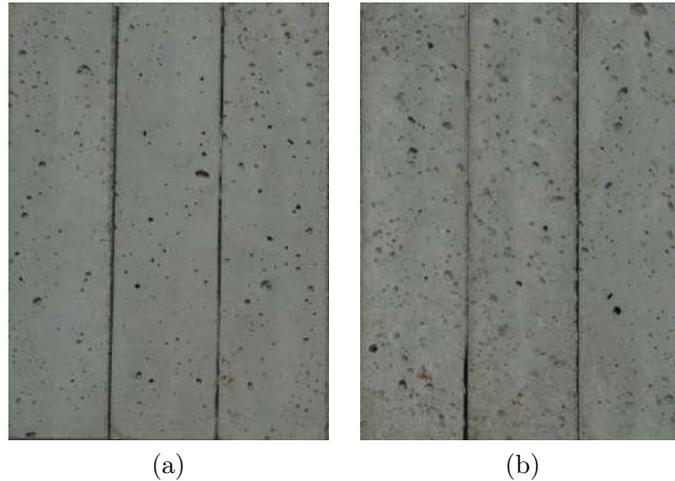


FIGURE G.10 – Variation de la couleur des mortiers en fonction de la quantité de huile de démoulage : (a) Huilé avec de papier d’essayage et (b) huilé avec une brosse

## G.6 Visite au chantier

### *Objectif*

L’objectif de cette visite été de visualiser sur place les défauts de surface des bétons bruts.

### *Mise en place*

Le chantier visité est un bâtiment en construction qui se trouve dans la rue Gaston Tessier au 19ème arrondissement de Paris. Les poutres et une partie des voiles sont des éléments préfabriqués. Les poteaux et les dalles sont coulés sur place. Le chantier est construit par Bouygues Construction.



FIGURE G.11 – Poutre préfabriquée

Les poutres ont été coulés horizontalement avec l’utilisation d’une table vibrante en deux couches (Figure G.11). Les voiles ont été coulés horizontalement avec l’utilisation d’une table vibrante en une couche (Figure G.12a). Les poteaux sont coulés verticalement avec l’utilisation d’une aiguille vibrante (Figure G.12b).

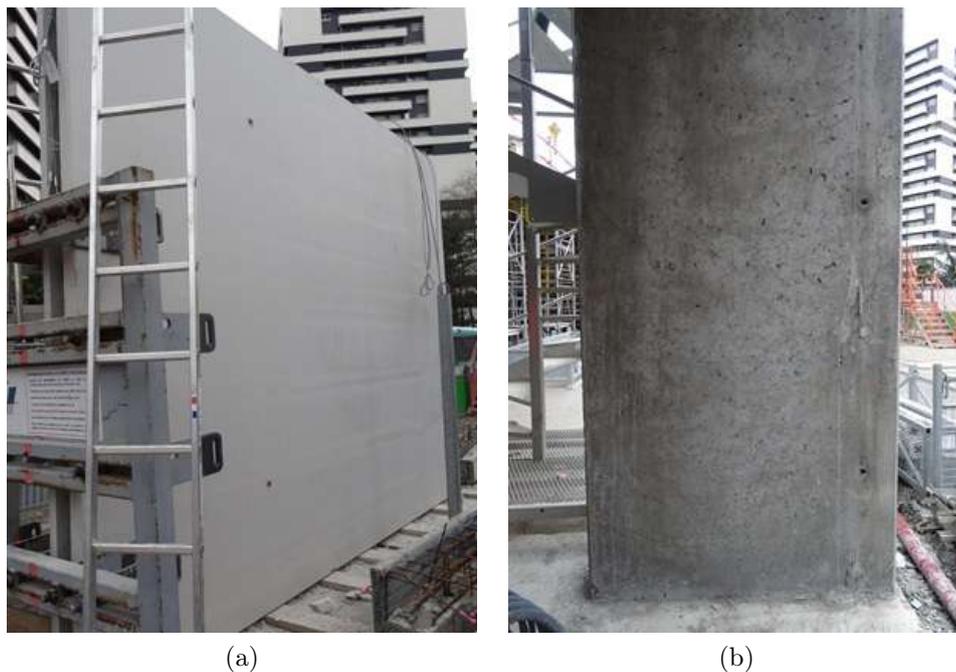


FIGURE G.12 – (a) Voile préfabriqué (b) Poteau

### *Observations*

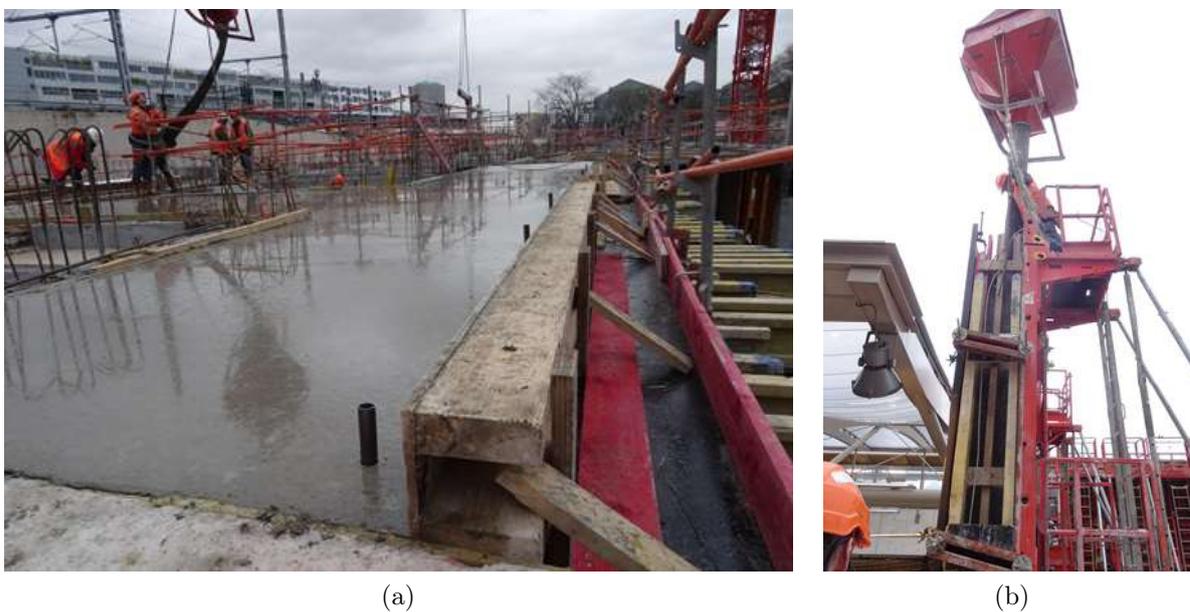


FIGURE G.13 – (a) Dalles coulées sur place (b) Poteau coulé sur place

Selon nos observations :

- Les structures coulées horizontalement (poutres, dalles et voiles) ont les surfaces plus homogènes par rapport aux structures qui ont été coulées verticalement (poteaux).
- Dans certains poteaux, les surfaces sont plus tachetées par rapport aux autres. Selon les constructeurs cela peut être dû à l'utilisation d'excès de huile de démoulage (Figure G.14).
- La présence de fines dans la formulation permet d'obtenir de surfaces plus homogènes.



(a)



(b)

FIGURE G.14 – (a) Surface coffrée avec un l'excès d'huile de démoulage (b) Surface coffrée recommandée avec d'huile de démoulage

## G.7 Mesure des états de surface

### Objectif

Mesurer l'état de surfaces d'une pâte de ciment qui a dans sa surface une variation de la teinte.

### Essais réalisés

Nous avons choisit une zone claire et une zone sombre d'un échantillon de pâte de ciment du rapport  $E/C = 0.40$ . Avec une seule mesure nous avons déterminé son état de surface en terme de  $R_a$ ,  $R_t$  et clarté en terme de  $L^*$ . Où  $R_a$  est rugosité moyenne arithmétique du profil et  $R_t$  est hauteur maximale du profil.

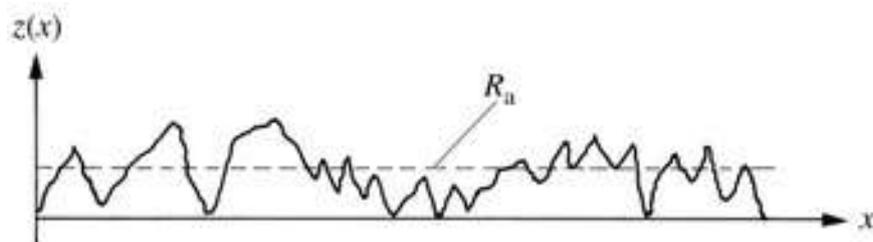


FIGURE G.15 – Paramètres de profil de l'état de surface



FIGURE G.16 – (a) Surface coffrée d'une pâte de ciment ( $E/C=0.40$ ) (b) 1 et 2 représentent les points de mesure de rugosité et de clarté

### Observations

A partir de la Figure G.17, nous observons que la surface de la pâte de la zone claire est moins texturée que la zone sombre. Donc, la zone sombre donne une surface plus rugueuse par rapport à la zone claire. De même, nous pouvons déterminer la forme du profil de rugosité en termes de  $R_a$  et  $R_z$ .

A partir de la Figure G.18, nous observons que le profil de la zones sombre est plus rugueuse que la zone claire.

A partir du Tableau G.4, on constate que les zones sombres (basse clarté) de la pâte de ciment sont rugueuses par rapport aux zones claires (haute clarté) et avec un écart moyen plus élevé ( $R_a$ ).

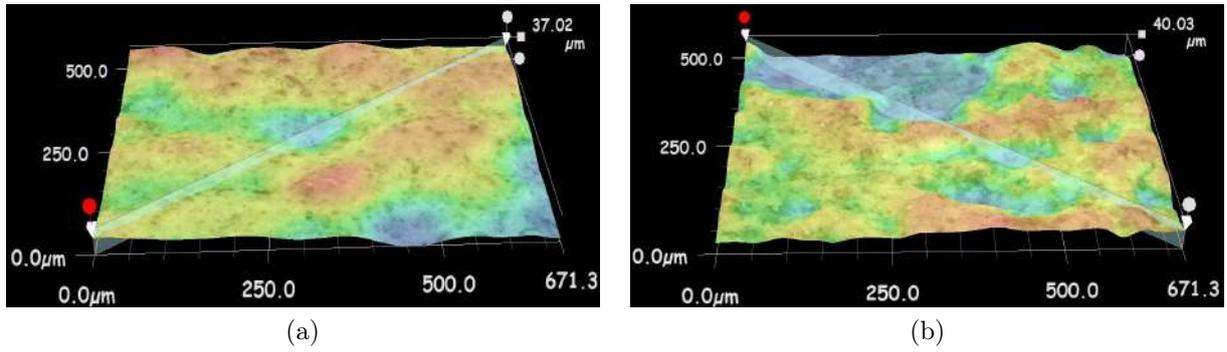


FIGURE G.17 – Image 3D des surfaces de la pâte de ciment (a) zone claire (b) zone sombre

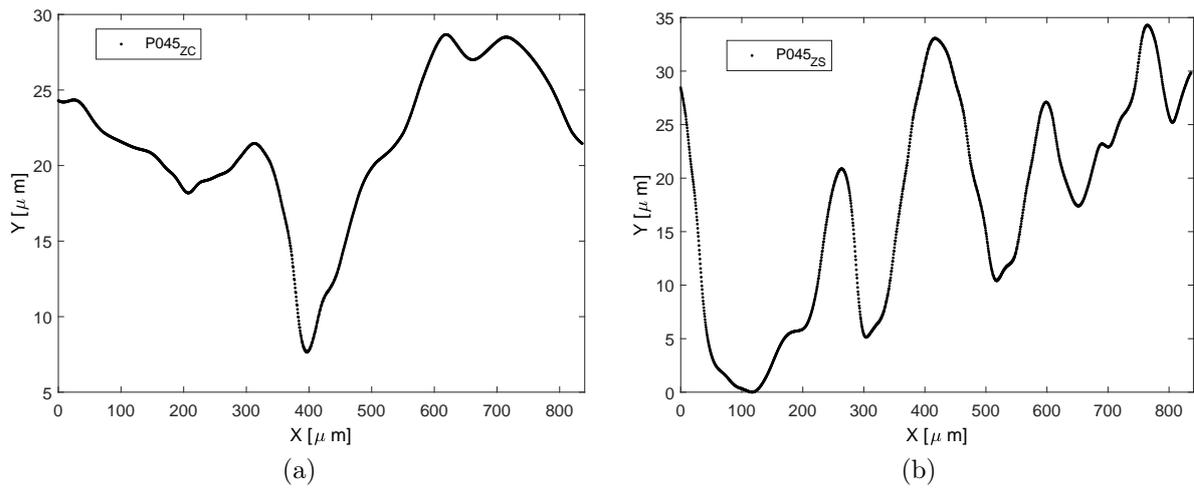


FIGURE G.18 – Profil des surfaces de la pâte de ciment (a) zone claire (b) zone sombre

| Parametre         | Zone sombre | Zone claire |
|-------------------|-------------|-------------|
| clarté (%)        | 64.05       | 69.11       |
| $R_a$ ( $\mu m$ ) | 17.05       | 13.93       |
| $R_t$ ( $\mu m$ ) | 34.32       | 21.03       |

TABLE G.4 – Valeurs de clartés et de paramètres de rugosités des zones sombres et claires.