

UNIVERSITE D'ARTOIS

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'université

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur

Option : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par

Samir BOUHAROUN

*Comportement tribologique des huiles de
décoffrage à l'interface béton/coffrage - Influence
de la formulation du béton*

Soutenue le 5 décembre 2011 devant la commission d'examen composée de :

Rapporteurs :	Mme Elhem GHORBEL	Professeur des Universités, Université de Cergy Pontoise
	M. Karim AIT MOKHTAR	Professeur des Universités, Université de la Rochelle
Directrice de thèse :	Mme Chafika DJELAL-DANTEC	Professeur des Universités, Université d'Artois
Co-directeur de thèse :	M. Yannick VANHOVE	Professeur des Universités, Université d'Artois
Examineurs :	Mme Pascale DE CARO	Maître de Conférences - HDR, ENSIACET Toulouse
	M. Yves DELMAS	Professeur des Universités, Université de Champagne – Ardenne
	M. Isam SHAHROUR	Professeur des Universités, Université Lille 1
Invitée :	Mme Isabelle DUBOIS-BRUGGER	Ingénieur de Recherche, Lafarge.

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe Matériaux du laboratoire de Génie Civile et de géo-Environnement du PRES "Lille Nord de France" à Béthune. Nombreux sont ceux que je voudrais remercier pour m'avoir aidé durant ces travaux de thèse.

Bien entendu, la palme des remerciements va à Pascale DE CARO, Maitre de conférence Habilité à Diriger des Recherches du Laboratoire de Chimie-Agroindustriel de l'Université de Toulouse, qui, pour son encadrement scientifique en physico-chimie. Qu'elle trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères pour son soutien durant ces quatre années de travail en commun, son humanisme et la précieuse formation qu'elle a su me transmettre en physico-chimie d'interface.

Je tiens également à remercier Mme. Isabelle Dubois ingénieur de Recherche au Laboratoire Central de Recherche de LAFARGE, qui malgré ses nombreuses occupations m'a fait l'honneur de participer au jury de ma thèse. Ses connaissances et son expérience dans le domaine des huiles de démoulage ont permis d'éclaircir certaines observations et résultats.

Je tiens à remercier M. Yves DELMAS pour avoir accepté de présider le jury de thèse mais également pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

J'exprime ma profonde gratitude à Mme. Elhem GHORBEL et M. Karim AIT MOTHTAR, rapporteurs de ce travail, avec qui les discussions ont été fructueuses et passionnées. J'adresse mes remerciements à M Isam CHAHROUR qui a accepté de participer au jury de thèse. Son avis sur ce travail permettra d'apporter des idées nouvelles pour les études futures.

Je tiens à remercier tout particulièrement mes collègues du laboratoire, Nassima, Mardy, Maamoun et Khaled pour leur soutien au cours de cette thèse ainsi que toute les personnes qui m'ont aidées tout au long de ces quatre ans tant par leur aide technique et scientifique que par leurs qualités morales.

Enfin, de façon très personnelle, je remercie Rima, ma femme, qui m'a épaulé sans condition pendant tout ce projet. Vous m'avez donné un support inconditionnel pendant les longues soirées de rédaction et les hauts et les bas de cette grande aventure. Je remercie mes parents qui ont toujours été très fiers des accomplissements et réussites de leurs enfants. Sans vous tous, il m'aurait été très difficile de trouver le courage de passer au travers un certain épisode et mettre à terme ce projet.

Résumé

Dans un contexte où le développement durable est devenu une priorité majeure, les entreprises du secteur du bâtiment doivent faire face à de nouvelles exigences en termes de respect de l'environnement. En particulier, lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages, une huile de démoulage d'origine minérale faiblement biodégradable est couramment utilisée comme couche séparatrice anti-adhérente. La nature de cette huile génère des risques importants de pollution environnementale. De nouvelles formulations d'huile de décoffrage d'origine végétale ont ainsi été développées.

L'apparition de cette nouvelle gamme de produit nécessite une connaissance suffisante de leur comportement à l'interface béton/huile/coffrage. Ce mémoire contribue à l'étude de l'influence de la formulation du béton sur le comportement tribologique à l'interface béton/coffrage en présence de deux huiles de démoulage de nature différente (une huile végétale et une huile minérale). La zone du béton à l'approche du coffrage a été étudiée à l'état durci et frais sans huile de démoulage. Tout d'abord, l'évolution de la densité apparente du béton à l'approche d'une paroi a été évaluée en fonction de la pression de contact et du volume de pâte. Puis, une analyse complète de cette zone à l'interface à l'état frais a été réalisée afin d'estimer le rapport E/L et la quantité de pâte mobilisée à l'approche de la paroi coffrante.

Une étude physico-chimique a été effectuée en reconstituant les milieux interstitiels de l'interface béton/huile/coffrage contenant un dosage différent en superplastifiant et en huile. Plusieurs techniques adaptées à ces milieux complexes, ont été utilisées afin d'évaluer la formation de savons et de déterminer la stabilité des émulsions obtenues. Cette thèse se conclut par une étude du frottement du béton frais contre une paroi coffrante avec et sans huile de démoulage à l'aide d'un tribomètre plan/plan. Plusieurs formulations de béton sont étudiées. Les résultats obtenus ont permis de comprendre le mode d'action des éléments fins et le dosage en superplastifiant aux interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage. Dans le cas de l'huile d'origine végétale, le savon formé à partir des esters et des acides gras contribue à réduire les frottements en stabilisant l'émulsion et en organisant l'interface. Cependant, la présence du superplastifiant est indispensable pour avoir des performances élevées dans le cas de l'huile minérale.

Mots clés :

Tribologie, Frottement, Interface Béton/Paroi, Interface Béton/Huile/Paroi, Agents de démoulage, Coffrage, Volume de Pâte, Dosage en Superplastifiant, Couche d'Interface, Formation de Savon, Milieu Interstitiel, Stabilité des Emulsions, Huile à Base Végétale, Huile à Base Minérale, Caractéristiques Physico-chimiques d'Interface, Mécanismes d'interface.

Abstract

In a context where sustainable development has become a major priority, the companies in the building field must face to new requirements in terms of the respect of environment. In particular, during the concrete pouring, a mineral release agent, poorly biodegradable is currently used as separating layer non-stick. The nature of this oil creates significant risks of environmental pollution. New formulations of release agent of vegetable origin were developed.

The appearance of this new product range requires a sufficient knowledge of their behavior at the concrete/release agent/formwork interface. This report aims to study the effect of concrete composition on the tribological behavior at the concrete/formwork interface with two release agents of different nature (vegetable release agent and mineral release agent). The zone of concrete near the formwork was studied without release agents. Firstly, the evolution of the density of the concrete at the approach of a wall was evaluated as a function of the contact pressure and the past volume. Secondly, a comprehensive analysis of this fresh layer was carried out to estimate the W/B ratio and the amount of paste mobilized close to the formwork.

A physico-chemical study was performed by reconstituting the interstitial medium of the concrete/release agent/formwork interface containing a different dosage of oil and superplasticizer. Several adapted techniques to these complex medium were used to evaluate the formation of soaps and to determine the stability of the obtained emulsions. This thesis ends with a study of the friction of fresh concrete against the formwork with and without release agent using a plan/plan tribometer. Many formulations of concrete were studied. The results allowed understanding the action mode of the fines element and the dosage of superplasticizer at the interfaces concrete/formwork and concrete/release agent/formwork. In the case of vegetable release agent, the formed soap from the esters and fatty acids contributes to reduce the friction by stabilizing the emulsion and organizing the interface. However, the presence of the superplasticizer is necessary to obtain a high performance for the mineral release agent.

Key Words:

Tribology, Friction, Concrete/Wall Interface, Concrete/Oil/Wall Interface, Release Agents, Formwork, Paste Volume, Superplasticizer Dosage, Interface Layer, Formation of Soap, Interstitial Medium, Stability of Emulsions, Vegetable Oil, Mineral Oil, Physicochemical characteristics of Interface, Interface Mechanisms.

Sommaire

REMERCIEMENTS	I
RESUME	II
ABSTRACT	III
SOMMAIRE	IV
Liste des Tableaux	VIII
Liste des Figures	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: FROTTEMENT DU BETON FRAIS – SYNTHESE DES APPAREILS DE MESURE EXISTANTS	6
I.1 INTRODUCTION	7
I.2 PRINCIPES DES TRIBOMETRES UTILISES EN MECANIQUE	8
I.3 LA TRIBOLOGIE DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL	9
I.3.1 FROTTEMENT INTERGRANULAIRE - POUSSEE DES BETONS CONTRE LES COFFRAGES	9
I.3.2 ETUDE DE L'INTERFACE BETON/COFFRAGE ET BETON/HUILE/COFFRAGE	15
I.3.3 ETUDE DE L'INTERFACE BETON/PAROI LORS DU POMPAGE DES BETONS	18
I.4 CONCLUSION	24
CHAPITRE II: LES MATERIAUX	27
II.1 INTRODUCTION	28
II.2 FORMULATION DES BETONS	28
II.2.1 MALAXAGE DU BETON	29
II.3 LES CONSTITUANTS DES BETONS	29
II.3.1 LES GRANULATS	29
II.3.2 LE CIMENT ET ADDITIONS CALCAIRES	31
II.3.3 L'EAU DANS LE BETON	32
II.3.4 LE SUPERPLASTIFIANT	33
II.3.4.1 Répulsion par effet électrostatique	33
II.3.4.2 Répulsion par effet stérique	34
II.3.5 PROPORTIONS DES CONSTITUANTS	34
II.3.5.1 Bétons ordinaires sans adjuvants	34
II.3.5.2 Bétons ordinaires adjuvés et BAP	36
II.4 CARACTERISATION DES BETONS FRAIS	37

II.4.1 OUVRABILITE _____	37
II.4.1.1 Essai d'affaissement _____	37
II.4.1.2 Essai d'étalement pour le BAP _____	38
II.4.2 ESSAIS COMPLEMENTAIRES POUR LE BAP _____	39
II.4.2.1 Boite en L _____	39
II.4.2.2 Stabilité au tamis _____	40
II.4.3 MESURE DE L'AIR OCCLUS _____	40
II.4.4 CARACTERISATION RHEOLOGIQUE DES BETONS _____	41
II.4.4.1 Appareillage et protocole expérimental _____	41
II.4.4.2 Bétons non adjuvés _____	43
II.4.4.3 Bétons adjuvés et BAP _____	45
II.5 CONCLUSION _____	47
CHAPITRE III: ETUDE DE L'INTERFACE BETON/PAROI _____	49
III.1 INTRODUCTION _____	50
III.2 ETUDE DU BETON A L'ETAT DURCI AU VOISINAGE DE LA PAROI _____	51
III.2.1 INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONTACT SUR LA DENSITE DU BETON _____	53
III.2.2 INFLUENCE DU VOLUME DE PATE SUR LA DENSITE DU BETON _____	54
III.3 ETUDE DE L'INTERFACE BETON/PAROI A L'ETAT FRAIS _____	56
III.3.1.1 Mesure de la densité à l'état frais _____	57
III.3.1.2 Mesure de la teneur en eau _____	58
III.3.1.3 Epaisseur moyenne du mélange récupéré par extraction _____	59
III.3.1.4 Analyse granulométrique _____	60
III.3.1.5 Composition du mélange récupéré par extraction _____	63
III.3.1.6 Rapport E/L du mélange prélevé _____	66
III.4 CONCLUSION _____	67
CHAPITRE IV: ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE LE SUPERPLASTIFIANT, LA SOLUTION INTERSTITIELLE ET L'HUILE DE DEMOULAGE _____	68
IV.1 INTRODUCTION _____	69
IV.2 LES HUILES _____	71
IV.2.1 MODE D'APPLICATION DES HUILES _____	71
IV.2.2 PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES HUILES _____	73
IV.2.3 MESURE DE LA TENSION SUPERFICIELLE LIQUIDE/VAPEUR _____	74
IV.2.3.1 Méthode expérimentale _____	74
IV.2.3.2 Résultats _____	76
IV.3 CARACTERISTIQUE DU SUPERPLASTIFIANT _____	76
IV.4 DEFINITION DE L'INTERFACE BETON/HUILE/COFFRAGE _____	77
IV.5 EXTRACTION DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE _____	78
IV.5.1 EFFET DE LA PRESSION _____	79

IV.5.2 EFFET DU VOLUME DE PATE _____	80
IV.5.3 EFFET DU DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT _____	82
IV.5.4 MESURE DU pH DES SOLUTIONS INTERSTITIELLES _____	83
IV.6 ANALYSES DES MILIEUX INTERSTITIELS RECONSTITUES _____	84
IV.6.1 COMPOSITION DES MILIEUX INTERSTITIELS _____	84
IV.7 MESURE DE L'ANGLE DE GOUTTE _____	84
IV.7.1 DEFINITION _____	84
IV.7.2 PRINCIPE DE MESURE _____	85
IV.7.3 METHODE EXPERIMENTALE _____	85
IV.7.4 ANGLE DE CONTACT DES HUILES ET DU SUPERPLASTIFIANT _____	86
IV.7.5 ANGLE DE GOUTTE DE LA SOLUTION INTERSTITIELLE DES BETONS _____	86
IV.7.6 ANGLE DE GOUTTE DES MILIEUX INTERSTITIELS _____	87
IV.8 RHEOLOGIE DES MILIEUX INTERSTITIELS _____	89
IV.8.1 PROTOCOLE EXPERIMENTAL _____	89
IV.8.2 RESULTATS OBTENUS _____	90
IV.8.2.1 Viscosité apparente des milieux interstitiels _____	90
IV.8.2.2 Influence du superplastifiant _____	92
IV.9 ETUDE DES MILIEUX INTERSTITIELS AU VOISINAGE DE LA PAROI _____	93
IV.9.1 FORMATION DE SAVON _____	95
IV.9.2 OBSERVATIONS VISUELLES DES MILIEUX INTERSTITIELS _____	97
IV.9.3 DETERMINATION DE LA QUANTITE DE SAVON _____	98
IV.9.3.1 Protocole expérimental _____	98
IV.9.3.2 Résultats _____	99
IV.9.3.2.1 Effet du temps sur la quantité de savon _____	100
IV.9.4 MESURE DU POTENTIEL ZETA DES MILIEUX EMULSIONNES _____	102
IV.9.4.1 Principe de la technique _____	102
IV.9.4.2 Dispositif expérimental et résultats _____	103
IV.10 ANALYSES DES SAVONS FORMES _____	105
IV.10.1 OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES DES SAVONS _____	105
IV.10.2 ANALYSE INFRAROUGE PAR SPECTROMETRIE DES SAVONS _____	107
IV.10.2.1 Protocole _____	107
IV.10.2.2 Résultats _____	107
IV.11 INTERPRETATION DES RESULTATS ET DU MODE D'ACTION _____	108
IV.12 CONCLUSION _____	108

CHAPITRE V: INFLUENCE DE LA FORMULATION DU BETON SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE AUX INTERFACES BETON/COFFRAGE ET BETON/HUILE/COFFRAGE _____ **111**

V.1 INTRODUCTION _____	112
V.2 CARACTERISTIQUE DE LA PLAQUE METALLIQUE _____	112
V.3 INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONTACT SUR LES FROTTEMENTS _____	113

V.4 EFFET DU VOLUME DE PATE	117
V.4.1.1 Effet du dosage en superplastifiant	118
V.4.1.2 Pulvérisation du superplastifiant sur la paroi	120
V.5 ETUDE DES FROTTEMENTS BETON/HUILE/COFFRAGE	123
V.5.1 BETONS ORDINAIRES	123
V.5.1.1 Comparaison des épaisseurs de film	126
V.5.1.2 Comportement des huiles de démoulage	128
V.5.2 BETON ADJUVANTES	129
V.5.2.1.1 Influence de la nature de l'huile	129
V.5.2.1.2 Comparaison des épaisseurs du film d'huile	132
V.5.2.1.3 Influence du dosage en superplastifiant	132
V.5.2.2 Bilan des phénomènes à l'interface béton/huile/coffrage	133
V.6 CONCLUSION	134
CONCLUSION GENERALE	136
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	142
ANNEXES	150
ANNEXE 1 : SUPERPLASTIFIANT GLENIUM 27	151
ANNEXE 2 : CIMENT CMI 52.5 N	153
ANNEXE 3 : FILLERS CALCAIRES BETOCARB - MQ	155
ANNEXE 4 : HUILE VEGETALE (ECO2)	156
ANNEXE 5 : HUILE MINERALE (OLEO50)	158
ANNEXE 6 : PULVERISATEUR – ECOSPRAY	160

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Tribomètres et appareils de frottement.	25
Tableau II-1 : Composition des bétons.	28
Tableau II-2 : Caractéristiques des granulats.	30
Tableau II-3 : Caractéristiques des bétons.	39
Tableau II-4 : Teneur en air occlus (%).	41
Tableau II-5 : Seuil de cisaillement et viscosité plastique pour les bétons ordinaires.	43
Tableau II-6 : Seuil de cisaillement et viscosité plastique pour les bétons adjuvés et le BAP.	46
Tableau III-1 : Densité des milieux à l'interface des bétons testés.	57
Tableau III-2 : Teneur en eau du mélange extrait à l'interface des bétons testés.	58
Tableau III-3 : Epaisseur de la couche d'interface pour les quatre bétons.	60
Tableau III-4 : Proportion des constituants du mélange extrait.	64
Tableau III-5 : Pourcentage des constituants mobilisés pour la formation de l'interface béton/paroi.	65
Tableau III-6 : récapitulatif des rapports (E/L)	66
Tableau IV-1 : Fiche technique des huiles.	71
Tableau IV-2 : Viscosité dynamique des huiles.	74
Tableau IV-3 : Tension de surface des deux huiles.	76
Tableau IV-4 : Concentration du superplastifiant dans l'eau du gachage des bétons.	77
Tableau IV-5 : Pourcentage de l'eau collectée pour le béton B28.	79
Tableau IV-6 : Mesure du pH des solutions interstitielles en fonction de la teneur en superplastifiant.	83
Tableau IV-7 : Milieux interstitiels formulés.	84
Tableau IV-8 : Angle de contact des huiles et le superplastifiant.	86
Tableau IV-9 : Angle de contact des solutions interstitielles et l'eau distillée.	86
Tableau IV-10 : Milieux interstitiels formulés.	87
Tableau IV-11 : Milieux interstitiels présents à l'interface béton/coffrage.	94
Tableau IV-12 : Quantité de savon après 1 min.	99
Tableau IV-13 : Quantité de savon après 12h.	101
Tableau IV-14 : Quantité de savon après 24h.	101
Tableau IV-15 : Potentiel zêta pour les milieux interstitiels à 5 % d'huile.	104
Tableau IV-16 : Potentiel zêta pour les milieux interstitiels à 10 % d'huile.	104
Tableau IV-17 : Résumé des effets observés au cours de cette étude.	108
Tableau V-1 : Récapitulatif du taux de réduction des contraintes de frottement – effet du superplastifiant.	122
Tableau V-2 : Récapitulatif du pourcentage de réduction des contraintes de frottement pour les bétons ordinaires – effet des huiles de décoffrage.	124
Tableau V-3 : Epaisseur de film d'huile avant et après le passage du système d'étanchéité.	126
Tableau V-4 : Récapitulatif du pourcentage de réduction des contraintes de frottement pour les bétons adjuvés et le béton autoplaçant (BAP) - effet des huiles de décoffrage.	131

Liste des figures

Figure I-1 : Les géométries utilisées pour les essais tribologiques [25].	8
Figure I-2 : Dispositif expérimental [26].	11
Figure I-3 : Détail d'un porte échantillon [10] [27].	12
Figure I-4 : Schéma de principe du tribomètre plan/plan [10] [27].	12
Figure I-5 : Tribomètre plan/plan [10].	13
Figure I-6 : Dispositif de mesure du coefficient de frottement [11].	14
Figure I-7 : Mesure du frottement et de la pression du béton sur le coffrage [9].	15
Figure I-8 : Schéma de l'appareil de Bleschik [39].	16
Figure I-9 : Appareil de Tanigawa [40].	16
Figure I-10 : Essai de frottement de Fujiwara et al [41].	17
Figure I-11 : Mécanisme d'une pompe péristaltique et (b) Mécanisme d'une pompe hydraulique à deux pistons [43].	18
Figure I-12 : Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage [29] [14].	18
Figure I-13 : Etude du frottement béton/paroi- Cas de pompage des bétons frais selon Ede [44].	19
Figure I-14 : Appareil de mesure de la pression de pompage de Best et Lane	20
Figure I-15 : Appareil de mesure du frottement développé par Morinaga [46].	20
Figure I-16 : Tribomètre à cylindres coaxiaux de Kaplan : (a) composants du tribomètre ; (b) tribomètre vide ; (c) tribomètre rempli de béton [29].	21
Figure I-17 : (a) Croquis du tribomètre, (b) vue générale avec tribomètre en caoutchouc et (c) vue de près avec tribomètre en acier en mouvement [43].	22
Figure I-18 : Tribomètre à cylindres coaxiaux de Ngo [14].	23
Figure II-1 : Courbes granulométriques des granulats utilisés.	30
Figure II-2 : Distribution de la taille des grains de ciment.	31
Figure II-3 : Distribution de la taille des grains du filler calcaire.	32
Figure II-4 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment de charges contraires munies des molécules du superplastifiant adsorbées sur leur surface [51].	34
Figure II-5 : Répulsion stérique entre les molécules du superplastifiant adsorbées sur deux grains de ciment [51].	34
Figure II-6 : Proportion des constituants pour les bétons ordinaires.	35
Figure II-7 : Quantité de fines inférieures à 80 μm dans les bétons ordinaires.	35
Figure II-8 : Proportion des constituants pour les bétons adjuvantés.	36
Figure II-9 : Quantité des fines dans les bétons adjuvantés.	37
Figure II-10 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.	38
Figure II-11 : Essai d'étalement pour le BAP.	38
Figure II-12 : Essai de la boîte en L.	39
Figure II-13 : Essai de stabilité au tamis.	40
Figure II-14 : Aéromètre pour béton.	41
Figure II-15 : (a) Rhéomètre ICAR et (b) Protocole expérimental.	42
Figure II-16 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre- couple en fonction de la vitesse de rotation.	43
Figure II-17 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction du volume de pâte.	44
Figure II-18 : Evolution de la viscosité plastique en fonction du volume de pâte.	44
Figure II-19 : Interprétation physique du modèle de Bingham [57] [19].	45
Figure II-20 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre - couple en fonction de la vitesse de rotation.	45
Figure II-21 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction du dosage en superplastifiant.	46

Figure II-22 : Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment [60].	46
Figure II-23 : Evolution de la viscosité plastique en fonction du dosage en superplastifiant.	47
Figure III-1 : Représentation schématique de la formation d'une couche limite au voisinage du coffrage	50
Figure III-2 : Découpe de l'échantillon en 8 tronçons cylindriques.	51
Figure III-3 : Photos des découpes pour une pression de contact de 30 et 90 kPa.	52
Figure III-4 : Densité du béton en fonction de la distance - effet de la pression de contact.	54
Figure III-5 : Densité du béton pour chaque tronçon -effet de la formulation du béton.	55
Figure III-6 : Densité de l'interface béton/coffrage.	56
Figure III-7 : Schéma explicatif du prélèvement de la couche d'interface	57
Figure III-8 : Évolution de l'épaisseur de la couche d'interface en fonction de volume de pâte pour les pressions de contact retenues.	60
Figure III-9 : Courbe granulométrique du milieu extrait du B28 et B30; tamisats cumulés et refus partiels.	61
Figure III-10 : Courbe granulométrique du milieu extrait du B32 et B34; tamisats cumulés et refus partiels.	62
Figure III-11 : Proportion des constituants du mélange extrait pour les quatre bétons.	63
Figure III-12 : Proportion des constituants mobilisés pour la formation de la couche d'interface	65
Figure III-13 : Variation du rapport E/L en fonction de la pression de contact pour les quatre bétons testés.	66
Figure IV-1 : Représentation schématique du milieu interstitiel.	70
Figure IV-2 : (a) Buse plate et (b) Buse conique.	72
Figure IV-3 : Pulvérisateur – Ecospray	73
Figure IV-4 : Géométrie SV DIN	73
Figure IV-5 : Contraintes de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.	74
Figure IV-6 : Principe de mouillage de la lame [70].	75
Figure IV-7 : Etapes de la mesure de la tension superficielle par la méthode de la lame [71].	75
Figure IV-8 : Concentration micellaire critique du superplastifiant dans l'eau à 25°C.	77
Figure IV-9 : Milieux présents à l'interface béton/huile/coffrage [1].	78
Figure IV-10 : Dispositif expérimental de l'essorage du béton frais.	79
Figure IV-11 : Eau collectée en fonction de la pression de contact pour un béton à 28 % de pâte.	80
Figure IV-12 : Effet de la pression de contact sur l'écoulement d'eau à l'interface pour les quatre bétons ordinaires.	81
Figure IV-13 : Effet des fines sur l'eau collectée pour chaque pression.	81
Figure IV-14 : Effet de la pression de contact sur l'écoulement d'eau à l'interface pour les quatre bétons adjuvantés et le BAP.	82
Figure IV-15 : Effet des fines sur l'eau collectée pour chaque pression.	83
Figure IV-16 : Schéma des forces agissant sur une goutte déposée à la surface d'un matériau.	85
Figure IV-17 : Goniomètre PGX.	86
Figure IV-18 : Evolution de l'angle de contact en fonction du dosage en superplastifiant.	87
Figure IV-19 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la teneur en huile pour MI-REF.	88
Figure IV-20 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la teneur en huile.	88
Figure IV-21 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la concentration en huile -effet du superplastifiant.	89
Figure IV-22 : Variation de la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour le milieu MI-B30 avec l'huile végétale Eco2.	90
Figure IV-23 : Comparaison de la variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile entre les milieux MI-B30 et MI-REF pour les deux huiles.	91
Figure IV-24 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les milieux MI-B30 avec les deux huiles.	91
Figure IV-25 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les deux huiles.	92

Figure IV-26 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les deux huiles- MI-BAP. _____	92
Figure IV-27 : Viscosité en fonction du dosage en superplastifiant pour les deux huiles. _____	93
Figure IV-28 : Structure chimique d'un carboxylate de calcium. _____	95
Figure IV-29 : Orientation des molécules d'esters et de savons au voisinage de la paroi [1] [28]. _____	96
Figure IV-30 : Schéma des micelles potentiellement présentes dans le milieu. _____	97
Figure IV-31 : Milieux interstitiels reconstitués _____	97
Figure IV-32 : Echelle pour apprécier la quantité d'émulsion formée pour 10% d'Oleo50. _____	98
Figure IV-33 : Echelle pour apprécier la quantité de savon formée dans la solution interstitielle préparée avec 10% d'Oleo50 ou 10% d'Eco2. _____	98
Figure IV-34 : Production de savon en fonction du dosage en superplastifiant. _____	100
Figure IV-35 : Zétasizer Nano ZS. _____	103
Figure IV-36 : Potentiel zêta en fonction du dosage en superplastifiant. _____	105
Figure IV-37 : Observations microscopiques _____	106
Figure V-1 : (a) schéma détaillé de la plaque métallique (dimensions en mm) et (b) Rugosimètre portable. _____	112
Figure V-2 : Schéma explicatif des paramètres de rugosité [1]. _____	113
Figure V-3 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction du temps pour un volume de pâte de 28% _____	114
Figure V-4 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour le béton B28 – effet de la pression de contact. _____	115
Figure V-5 : Formation de la couche limite. _____	115
Figure V-6 : Représentation schématique du contact grains - grains dans le béton. _____	116
Figure V-7 : Plan de cisaillement de la couche limite. _____	116
Figure V-8 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact – effet du volume de pâte. _____	117
Figure V-9 : Agglomération des grains de ciment [87]. _____	117
Figure V-10 : Représentation schématique de l'interface : (a) volume de pâte faible, (b) volume de pâte élevé. _____	118
Figure V-11 : Evolution de la contrainte de frottement fonction de la pression de contact pour les bétons à 30 et 34% de pâte – effet du dosage en superplastifiant. _____	119
Figure V-12 : Evolution de la contrainte de frottement fonction de la pression de contact pour les bétons adjuvantés et le béton autoplaçant. _____	119
Figure V-13 : Evolution des contraintes de frottement en fonction du dosage en superplastifiant. _____	120
Figure V-14 : Evolution de la contrainte de frottement pour les bétons à 30% de pâte. _____	121
Figure V-15 : Evolution de la contrainte de frottement pour les bétons à 34% de pâte _____	121
Figure V-16 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage en présence des bétons ordinaires. _____	123
Figure V-17 : Effet de l'huile de démoulage sur l'adhésion entre le béton et le coffrage. _____	124
Figure V-18 : Effets présents à l'interface béton/huile/coffrage. _____	125
Figure V-19 : Variation de l'épaisseur du film d'huile en fonction de la pression de contact. _____	127
Figure V-20 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact et du volume de pâte, pour les deux huiles. _____	128
Figure V-21 : Représentation schématique de l'influence du volume de pâte sur l'interface béton/huile/coffrage : (a) volume de pâte faible et (b) volume de pâte important. _____	128
Figure V-22 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage en présence des bétons adjuvantés. _____	130
Figure V-23 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces BAP/coffrage et BAP/huile/coffrage en présence des deux huiles de démoulage. _____	130
Figure V-24 : Variation de l'épaisseur du film d'huile en fonction de la pression de contact. _____	132

Figure V-25 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour l'huile végétale (Eco2) - effet du dosage en superplastifiant. _____ 133

Figure V-26 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour l'huile minérale (Oleo50) - effet du dosage en superplastifiant. _____ 133

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction à coût raisonnable, fluide au moment de sa mise en place et résistant après son durcissement. Il est désormais devenu un élément incontournable du monde de la construction, de l'architecture et du bâtiment. Utilisé parce qu'il est économique, pratique et disponible partout, il fait face aujourd'hui aux défis de l'environnement. Depuis son origine, le béton a toujours été fabriqué à partir de liant, d'eau et de granulats.

Les exigences nouvelles en matière de caractéristiques techniques ont poussé les formulateurs à introduire dans la composition des bétons de nouveaux produits afin d'obtenir des propriétés particulières (ouvrabilité, résistance mécanique, qualité des parements,...). En effet, les développements apportés par l'industrie des liants hydrauliques, la mise au point d'adjuvants spécifiques de synthèse ainsi que l'emploi d'ultrafines ont permis d'optimiser la composition du béton, et d'améliorer leur mise en œuvre, leur durabilité et leur résistance.

Ces innovations dans le domaine du matériau béton exigent également, des huiles de démoulage adaptées aux nouvelles formulations, notamment pour les bétons adjuvés. Un agent de démoulage est appliqué sur une paroi coffrante pour offrir une séparation facile du béton durci du coffrage en diminuant les forces d'adhésion présentes à l'interface béton/coffrage. Il permet également de protéger la surface du coffrage contre la corrosion et de faciliter le nettoyage [1]. Ces huiles de démoulage, habituellement des dérivés du pétrole, représentent une part importante du marché. Aujourd'hui, on trouve des formulations d'huile à base végétale qui ont été mises au point pour répondre aux exigences environnementales et protéger les utilisateurs de maladies professionnelles reconnues [1] [2]. L'apparition de cette nouvelle gamme de produits nécessite l'acquisition de connaissances relatives à leur mode d'action afin d'optimiser la qualité des ouvrages et la durée de vie des coffrages.

Le choix de ces agents de démoulage est effectué en fonction de la nature du coffrage et de la qualité du parement à obtenir [3] [4] [5]. La nature de l'agent de démoulage et son mode d'application conditionnent l'esthétique du parement, en particulier l'homogénéité de la surface et l'absence de bullage [1] [6] [7]. En effet, il est conseillé d'appliquer l'agent de démoulage par pulvérisation en une couche mince et régulière et d'employer des buses en acier inoxydable les plus fines possible [8]. L'amélioration des performances d'un agent de démoulage nécessite une connaissance approfondie des actions survenant à l'interface béton/huile/coffrage.

Lors de la mise en place du béton dans le coffrage, plusieurs phénomènes peuvent se produire à proximité de la paroi coffrante. Parmi ces phénomènes, le frottement du béton frais qui intervient à l'interface béton/huile/coffrage au cours et après le coulage [9] [10] [11] [12].

Ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont intéressés aux frottements à l'interface béton/paroi. En 2001, Vanhove [10] a réalisé une première étude sur le comportement

tribologique du béton frais à l'interface béton/coffrage. La plupart des auteurs s'accorde sur le fait que le comportement tribologique du béton frais à l'interface béton/paroi dépend principalement de la nature des espèces chimiques en présence, et notamment de l'huile de démoulage et la composition du béton [1] [10]. De plus, dans le cas du pompage des bétons frais, certains auteurs ont montré qu'une augmentation du volume de pâte, du rapport eau/liant et l'ajout d'un superplastifiant dans le béton facilitent la formation d'une couche limite lubrifiante au voisinage de la paroi [10] [13] [14].

Actuellement, il existe de nombreuses lacunes dans la compréhension des mécanismes qui se produisent lors du frottement du béton frais contre la paroi en présence de l'huile de démoulage. Ces mécanismes sont complexes et difficiles à déterminer car plusieurs paramètres (composition de la couche limite, conditions de chantier, interaction huile de démoulage/ciment, etc.) entrent en jeu. Dans son étude, Vanhove [10] a réalisé une première approche sur l'étude tribologique d'un béton autoplaçant en présence de trois agents de démoulage couramment utilisés sur chantier. Libessart [1], quant à lui, a étudié l'influence de la formulation des huiles sur les frottements à l'interface béton/huile/coffrage en présence d'un béton ordinaire. Il a identifié deux mécanismes de lubrification à l'interface béton/huile/coffrage en fonction de la nature de l'huile de démoulage. Les huiles à base minérale agissent physiquement en formant une pellicule isolant la paroi du béton, alors que pour les huiles végétales, un effet chimique se superpose. Les esters végétaux au contact du béton génèrent des carboxylates insolubles hydrophobes.

L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement tribologique du béton frais au voisinage de la paroi coffrante. Ce travail a également pour but d'améliorer la connaissance des phénomènes de lubrification interfaciale en présence du superplastifiant avec deux huiles de démoulage de nature différente. On s'intéresse en particulier à l'analyse de la couche de matériau à l'approche du coffrage et aux éventuelles interactions entre la solution interstitielle du béton frais, le superplastifiant et l'huile de démoulage, pour expliquer les mécanismes qui régissent les frottements lors de la mise en œuvre du béton dans le coffrage.

Afin de mieux comprendre les phénomènes physiques qui déterminent le comportement d'interface du béton frais, plusieurs formulations ont été testées à l'aide d'un tribomètre afin d'identifier l'influence du volume de pâte et du dosage en superplastifiant en contact avec la paroi coffrante. L'analyse du comportement de l'interface a été effectuée à partir d'essais de cisaillement, avec et sans huile de démoulage, à vitesse et pression de confinement imposées dans la géométrie de cisaillement plan/plan. Le présent mémoire comporte cinq parties :

Le premier chapitre fait l'objet d'une étude bibliographique ayant pour but de préciser l'état de l'art sur les tribomètres développés pour étudier le comportement tribologique des bétons frais. Ce chapitre présente tout d'abord la définition de la tribologie, son application ainsi que les géométries utilisées pour les essais tribologiques. Un intérêt particulier est donné aux besoins dans le domaine du génie civil (pompage, mise en œuvre du béton dans le coffrage etc.). Cette étude bibliographique se termine par une description détaillée des tribomètres et des

appareils permettant de mesurer les frottements aux interfaces béton/tuyaux, béton/coffrage et béton/huile/coffrage.

Le deuxième chapitre est consacré aux propriétés des matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Il débute par la présentation des formulations des bétons et la description de ses constituants. Ensuite, une définition de la pâte et des fines est effectuée. Enfin, les essais de caractérisation qui permettent la détermination de l'ouvrabilité et de l'air occlus ainsi que les propriétés rhéologiques des bétons frais sont présentés.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la couche du béton au voisinage de la paroi coffrante. Afin de mieux comprendre le rôle du volume de pâte sur les frottements à l'interface béton/coffrage, une analyse de la composition de la couche d'interface a été effectuée sur les bétons ordinaires à l'état durci et frais. Des éprouvettes en bétons durcis ont été découpées pour suivre l'évolution de la densité en fonction de l'épaisseur de l'échantillon. L'effet de la pression de contact et du volume de pâte sur la densification du matériau à l'interface béton/coffrage est présenté. Nous terminerons par l'analyse de la composition de cette couche d'interface à l'état frais afin de déterminer la quantité de pâte mobilisée à l'approche de la paroi en fonction de la pression de contact et le volume de pâte.

Le quatrième chapitre de ce travail aborde une étude physico-chimique des deux interfaces béton/huile et huile/coffrage. Cette étude est nécessaire pour la compréhension des phénomènes qui interviennent à l'interface béton/paroi en présence des agents de démoulage. Dans un premier temps, les propriétés des huiles de démoulage et de l'adjuvant sont présentées. Ensuite, l'extraction des solutions interstitielles de bétons à l'état frais a permis de préparer des milieux interstitiels et de s'approcher ainsi des compositions des milieux réels au voisinage de la paroi. Plusieurs techniques adaptées à ces milieux complexes, ont été mises en œuvre pour étudier les affinités entre phases, pour évaluer la formation de savons et pour déterminer la stabilité des émulsions obtenues. Les comportements rhéologiques de ces milieux ont été déterminés en suivant la viscosité et l'influence de la teneur en superplastifiant. Des corrélations entre les données obtenues permettent d'expliquer le comportement de chacune des deux formulations et d'identifier les paramètres clés qui gouvernent les processus aux interfaces présents entre béton et paroi.

Le cinquième chapitre présente les résultats de la campagne expérimentale menée sur l'étude de frottement du béton frais sans et avec agents de démoulage à l'aide d'un tribomètre plan/plan. Tout d'abord, une étude complète sur le frottement des bétons frais contre une plaque métallique est présentée. Cette étude constitue une étape préliminaire mais néanmoins essentielle permettant de discerner les mécanismes élémentaires du phénomène de frottement à l'interface béton/paroi sans agent de démoulage. Ce chapitre met en évidence l'effet des éléments fins et le dosage d'un superplastifiant courant non chloré à base d'éther polycarboxylique sur l'évolution des contraintes de frottement à l'interface béton/paroi. Des essais tribologiques ont été réalisés sur quatre bétons ordinaires à différent volume de pâte, quatre bétons adjuvés et un béton autoplaçant. L'analyse des frottements du béton autoplaçant contre le coffrage a été effectuée

pour mettre l'accent sur le rôle du superplastifiant en présence d'un volume de pâte important (36%). Des essais de frottement en présence des huiles de démoulage ont été effectués. L'influence de la formulation du béton et la pression de contact sur l'évolution de l'épaisseur du film d'huile est ainsi présentée. Ces résultats sont expliqués à l'aide des conclusions physico-chimiques obtenues dans le chapitre précédent.

Chapitre I:

Frottement du béton frais – Synthèse des appareils de mesure existants

I.1 Introduction

Le remplissage des coffrages par du béton fait intervenir plusieurs propriétés, que ce soit les caractéristiques du béton mis en œuvre ou de l'interface béton/huile/coffrage. Pour ces dernières le terme à utiliser est caractéristiques tribologiques.

La littérature qui a été consacrée jusqu'à maintenant à la tribologie des bétons est pauvre et se trouve quasi orientée vers la rhéologie de volume. Il a ainsi été montré que ces matériaux sont non-newtonien, parfois à seuil et souvent thixotrope [15] [16] [17]. Leur comportement en régime permanent a été défini à l'aide d'un modèle pseudo-plastique ou d'un modèle de Herschel-Bulkley [18] [19] [20].

L'interface béton/paroi est régi par un frottement de type Coulomb qui exprime que la contrainte tangentielle au contact est proportionnelle à la contrainte normale ; le coefficient de proportionnalité est le coefficient de frottement. Ces phénomènes bien établis dans les milieux granulaires secs n'ont fait l'objet que de très peu d'études dans les systèmes pâteux ou à fluides complexes, même s'il faut s'attendre à ce que la présence d'un fluide interstitiel réduise fortement le coefficient de frottement.

La tribologie (étude des frottements) est une science reconnue en mécanique. Ce terme a été utilisé la première fois [21], il y a une vingtaine d'années en génie civil dans une étude sur les problèmes rencontrés lors de l'extrusion de pâte d'argile. Le frottement intervient dans ce cas sous un aspect défavorable dans la filière et dans la vis servant à propulser la pâte et sous l'aspect d'un facteur indispensable au bon fonctionnement de la vis propulsive en empêchant celle-ci d'entraîner la pâte en rotation par adhérence au fourreau dans lequel elle tourne. Un appareil permettant d'étudier le frottement entre la pâte d'argile et la paroi a été conçu : le premier tribomètre en génie civil. Son principe plan/plan a été repris par Beaumel en 1998 [22] pour étudier l'extrusion des mélanges argile/sable/eau dans des conditions industrielles puis par Vanhove, en 1997 pour étudier le frottement des bétons lors des pompes [23] et lors de sa mise en œuvre dans les coffrages [10].

En mécanique, de nombreux laboratoires simulent les frottements rencontrés dans la vie courante tels que le freinage des roues sur le bitume, des roues sur les rails, des skis sur la neige ou encore le frottement de l'eau sur les coques des bateaux. L'usure des matériaux fait également l'objet de nombreuses études. Au moment de réaliser des essais tribologiques, le chercheur se trouve confronté à un problème de choix : choix des conditions opérationnelles, choix des variables d'essais à mesurer, choix des paramètres à faire varier et enfin choix ou définition d'un tribomètre [24].

Les recherches entreprises dans ce domaine diffèrent d'un laboratoire à un autre, ce qui explique la variété de ces appareils de frottement. En effet, chaque laboratoire va concevoir un tribomètre adapté à son étude. Une étude bibliographique nous a permis de recenser les différents tribomètres existants en mécanique et en génie civil.

I.2 Principes des tribomètres utilisés en mécanique

Des dispositifs expérimentaux à différentes géométries ont été mis au point. La Figure I-1 illustre les essais tribologiques normalisés, qui sont couramment utilisés dans le cas d'abrasion, de mouvement par roulement ainsi que par glissement.

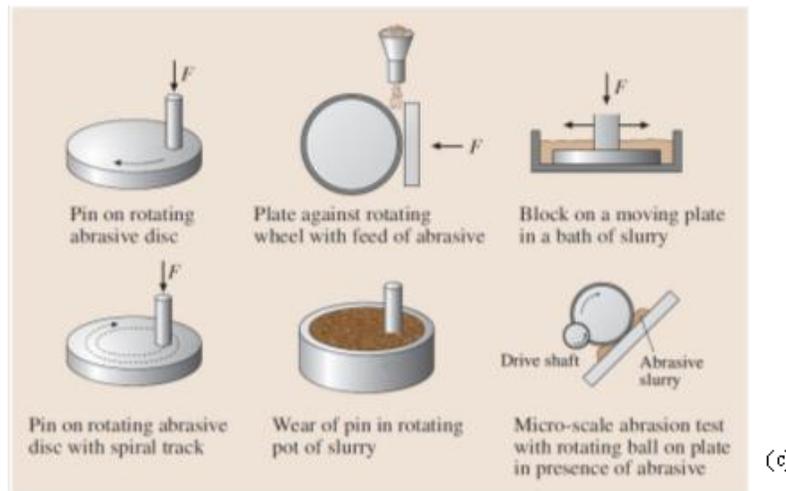
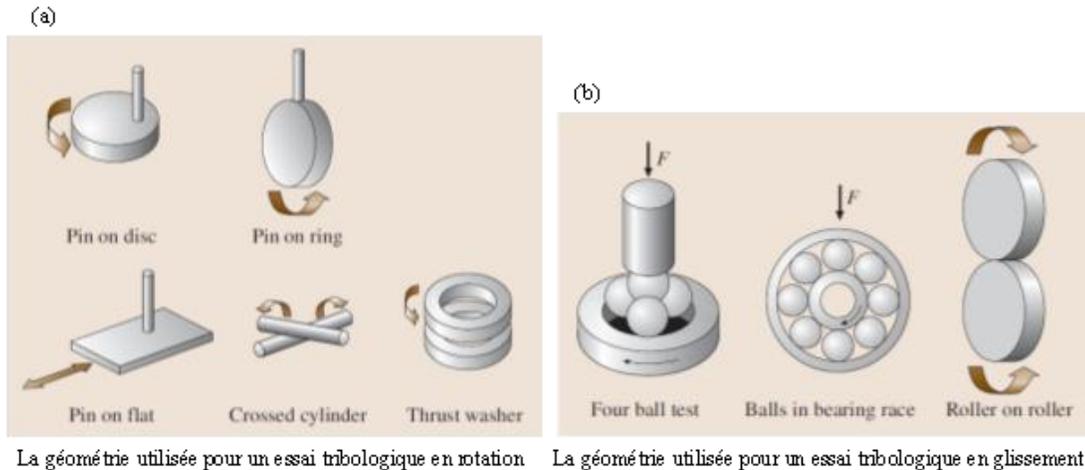


Figure I-1 : Les géométries utilisées pour les essais tribologiques [25].

La première configuration a été conçue pour des problèmes de frottement ou d'usure en glissement. La plupart des tests tribologiques ont été développés depuis longtemps pour des applications aux matériaux traditionnels, souvent massifs et soumis à des charges relativement élevées. Le plus courant est le test pion-sur-disque (Figure I-1-a) [25]. La deuxième géométrie est généralement utilisée dans le cas de l'usure par abrasion. Deux types peuvent être distingués [25] :

- chargement d'un échantillon pion sur un papier abrasif posé sur un support solide,
- l'échantillon est pressé contre une roue en rotation en présence d'une alimentation continue en particules abrasives.

Le troisième type des tests tribologique consiste en des géométries adaptées au mouvement par roulement. Trois configurations peuvent être utilisées ; test des quatre billes, roue sur roue et billes dans un chemin circulaire de roulement [25].

Dans certains cas, les inconvénients du frottement nécessitent d'introduire un fluide visqueux dans l'interface séparant les deux solides afin de diminuer considérablement la résistance au glissement. Ce qui permet de protéger contre l'usure adhésive les pièces en contact. Les interactions entre les deux corps en contact, et la mobilité des particules à l'interface sont essentiellement fonction de l'épaisseur du film lubrifiant interposé. Les caractéristiques et le fonctionnement d'un lubrifiant dépendent fortement du comportement mécanique des corps en contact.

I.3 La tribologie dans le domaine du génie civil

Ces dernières années, le frottement a été étudié dans les cas suivants :

- le frottement intergranulaire pour étudier les poussées des bétons [26] [23], mais cette étude fait également intervenir la connaissance du coefficient de frottement béton/huile/coffrage,
- le frottement à l'interface béton/huile coffrage lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages [10] [27] pour l'étude de l'influence de la nature des huiles de démoulage et l'aspect des parements [1] [28],
- le frottement béton/tuyau lors du pompage [29] [14] [13].

I.3.1 Frottement intergranulaire - poussée des bétons contre les coffrages

L'écoulement du béton lors de sa mise en œuvre dépend des propriétés intrinsèques du matériau. En 1977, Barrioulet [30] a établi un modèle d'interaction entre les grains constituant le mélange afin de comprendre le comportement du béton frais en écoulement. Il a montré que la phase granulaire du béton frais résiste au cisaillement grâce à un processus mécanique faisant intervenir l'enchevêtrement et les frottements des grains constituant le mélange.

Ce processus dépend à la fois des caractéristiques physiques des granulats (dimension, forme, masse, etc.) et de leur concentration dans le mélange. Si le seuil de cisaillement (τ_0) est régi uniquement par le nombre et la nature des contacts entre les granulats, l'angle de frottement interne (φ) dépend principalement de la concentration et de la rugosité des particules [31] [32]. Dans ce cas, ce phénomène peut être décrit par le modèle de Mohr-coulomb.

$$\tau_k = C + \sigma \tan \varphi \quad \text{I-1}$$

Avec :

τ_k est la contrainte de cisaillement (Pa), C représente cohésion du béton (Pa), σ est la contrainte de rupture et $\tan \varphi = \mu$ coefficient de frottement avec φ qui représente l'angle de frottement.

Des chercheurs [33] [32] [34] ont montré que la cohésion dans le béton frais est générée par les forces d'attraction électrostatiques entre les particules (forces de Van Der Waals). Le frottement intergranulaire et la cohésion du béton dépendent du rapport E/C, de la nature et de la finesse du ciment. En effet, l'accroissement de la surface spécifique du ciment est suivi d'une augmentation des frottements intergranulaires dans la pâte de ciment. Par contre, l'augmentation du rapport E/C est traduite par un abaissement du frottement intergranulaire dans le mélange [35].

L'angle de frottement interne (φ) pour les bétons peut être déterminé à l'aide d'un appareil triaxial couramment utilisé en mécanique des sols. L'Hermitte [36] a mesuré à l'aide de ce dispositif l'angle de frottement interne d'un béton composé d'une granulométrie continue avec 300 kg de ciment par mètre cube et un rapport eau/ciment de 0,65. Selon cet auteur, l'angle apparent du béton se situerait entre celui de la pâte (24°) et celui des gravillons saturés en eau ($38,7^\circ$). Baudeau [37] pour son étude sur les poussées des bétons a mesuré le coefficient de frottement d'un micro béton possédant une granulométrie continue avec un dosage en ciment CHF 45 de 560 kg/m^3 et un rapport eau efficace/ciment égal à 0,46. Il a trouvé un angle de frottement interne de 35° .

En s'inspirant du modèle de Janssen utilisé dans les milieux de la mécanique granulaire pour le dimensionnement des silos, Vanhove [10] a proposé un modèle pour prédire les poussées des bétons contre les coffrages. Dans son modèle intervient également le coefficient de frottement intergranulaire :

$$P_{JC}(h) = \frac{\rho g - \alpha \tau_0 (2e + 2L)}{\alpha (2e + 2L) \mu K} \left(1 - e^{-\frac{\alpha (2e + 2L) \mu K}{A} h} \right) \quad \text{I-2}$$

Où τ_0 représente le seuil de cisaillement, μ le coefficient de frottement à la paroi, A la section du voile en béton, e l'épaisseur du coffrage, α un coefficient tenant compte de l'inégalité d'Amontons-Coulomb, h la hauteur du béton dans le coffrage, K le coefficient de frottement intergranulaire, L la largeur du coffrage, ρ la masse volumique absolue du matériau, g l'accélération de la pesanteur.

Le coefficient de frottement intergranulaire (K) est déterminé à partir de l'équation de Rankine :

$$\tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{N'}{N} = K \quad \text{I-3}$$

Où φ est l'angle de frottement interne, N l'effort normal et N' l'effort du matériau sur la paroi du coffrage.

Afin de déterminer ce coefficient, un dispositif reprenant le principe de l'appareil triaxial en mécanique des sols a été mis au point par Vanhove [10] (Figure I-2). Les essais ont été réalisés dans des conditions non drainées. Un échantillon de béton frais de 120 mm de diamètre et de 100 mm de profondeur est comprimé entre deux fonds mobiles.

Un capteur placé derrière le fond mobile permet de déterminer la force N appliquée sur le matériau suivant la direction Ox . Un capteur à membrane placé sur la partie supérieure du porte-échantillon permet de déterminer la force N' exercée sur les parois suivant la direction Oy . Ce dispositif ne donne qu'une valeur ponctuelle de la variation de la pression latérale sur une petite surface (environ 20 cm²). φ est égal à 30 ° pour un béton fluide et est proche de 0 ° pour un béton autoplaçant.

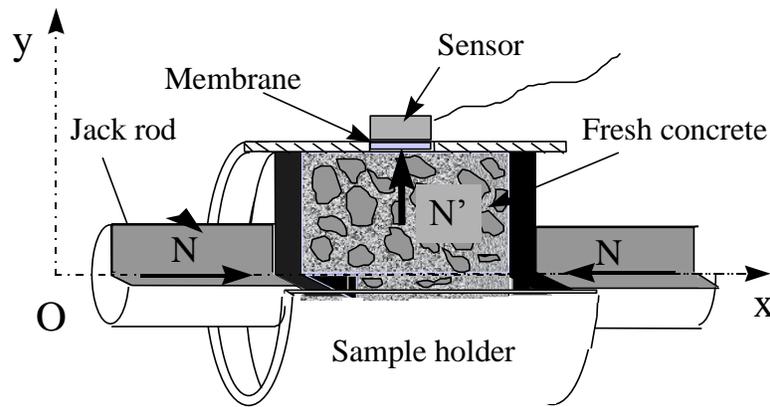


Figure I-2 : Dispositif expérimental [26].

D'autres modèles ont été développés pour les bétons frais. Roussel et *al* [12] et Proske [11] [38] ont également établi un modèle basé sur la théorie des silos de Janssen et du modèle de Vanhove [10].

La prédiction de la pression dans les coffrages reste un sujet d'actualité malgré que cette problématique ait été posée depuis plusieurs années.

Pour mesurer le coefficient de frottement entre le béton et la paroi du coffrage, Vanhove [10] a construit un tribomètre. Le principe de cet appareil consiste à faire glisser deux échantillons de béton frais sur une plaque métallique à différentes pressions de contact. Le béton est placé dans des porte-échantillons de 120 mm de diamètre dans lesquels vient s'ajuster un fond mobile (piston). Le rôle du piston est de transmettre la pression exercée par un vérin pneumatique (Figure I-3) aux échantillons de béton afin de les appliquer contre la plaque. La mise en mouvement de la plaque s'effectue à l'aide d'un moteur accouplé à une vis sans fin.

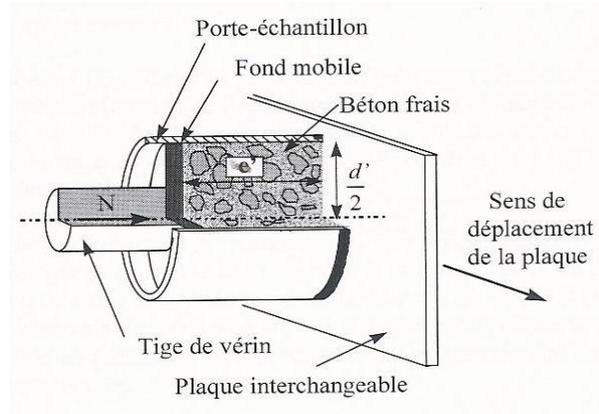


Figure I-3 : Détail d'un porte échantillon [10] [27].

Le déplacement de la plaque est de 800 mm. La pression de contact peut atteindre 1700 kPa. La vitesse de glissement varie de 0 à 300 mm/s. Dans ce dispositif, la vitesse de glissement de la plaque simule la vitesse de bétonnage et la pression appliquée contre la plaque la poussée du béton frais contre le coffrage.

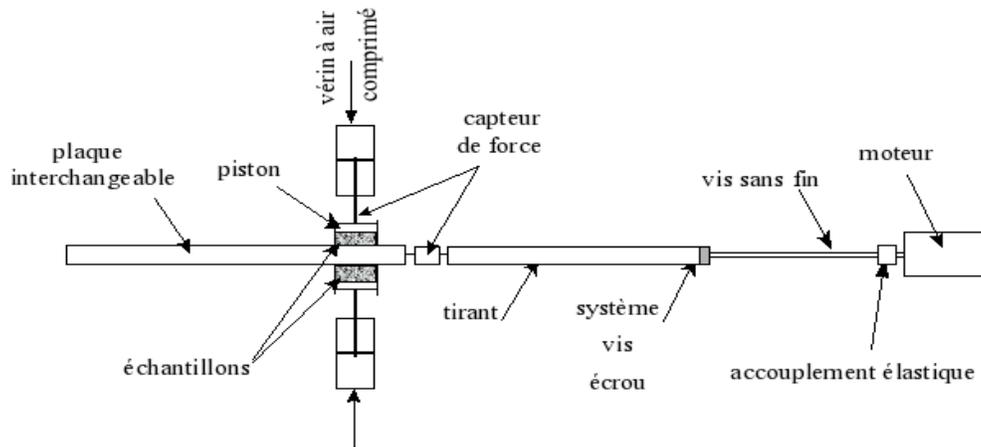


Figure I-4 : Schéma de principe du tribomètre plan/plan [10] [27].

La plaque interchangeable se déplace à une vitesse V tandis que la force de traction $2F$ est mesurée à l'aide d'un capteur. Après avoir mesuré la force de frottement F , on calcule la contrainte de frottement τ_f en divisant la force obtenue par la surface de l'échantillon en contact avec la plaque $S_c = \frac{\pi \times d^2}{4}$, d est le diamètre du porte-échantillon.

$$\tau_f = \frac{F}{S_c} \quad \text{I-4}$$

Le capteur de force normale donne la force exercée par le vérin sur le piston. Cette valeur est notée N . La pression de contact ou contrainte normale est donnée par :

$$P = \frac{N}{S_c} \quad \text{I-5}$$

Avant chaque essai, un enregistrement de la force de frottement du système d'étanchéité en contact avec la plaque est réalisé. Cette force est appelée force parasite F_{par} . Elle doit être faible pour ne pas perturber la mesure du frottement du béton.



Figure I-5 : Tribomètre plan/plan [10].

F_{mes} correspond à l'enregistrement du frottement de l'ensemble béton + système d'étanchéité. Le calcul de la contrainte de frottement obtenue à partir de la loi de Coulomb est donné par l'équation suivante :

$$F = \frac{F_{mes} - F_{par}}{2} \quad \text{I-6}$$

Dans l'esprit du tribomètre plan/plan développé par Vanhove [10] (Figure I-5), Proske [11] a également proposé un tribomètre permettant la mesure du coefficient de frottement. Le béton frais est introduit dans un cube en bois de dimensions 250×250×250 mm renforcé par une ossature externe en acier. Un vérin hydraulique exerce une force notée F_{v1} sur la partie supérieure mobile de la boîte (Figure I-6). Cette force appliquée par palier correspond au poids du béton frais introduit in situ en plusieurs déversements pour atteindre la hauteur totale du coffrage. Les forces horizontales notées F_{h2} et F_{h1} correspondent à la réaction sur le coffrage de la force F_{v1} . Ces forces sont mesurées à l'aide de deux capteurs de pression fixés sur deux plaques mobiles de 100×100 mm.

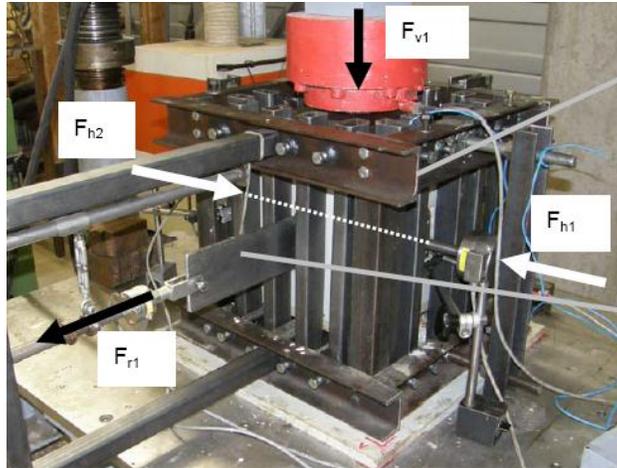


Figure I-6 : Dispositif de mesure du coefficient de frottement [11].

Une plaque métallique de 10 cm de hauteur et de 6 mm d'épaisseur est introduite dans la boîte d'essai sur une distance maximale de 25 cm. Celle-ci est reliée à un capteur de traction permettant d'évaluer la force F_{r1} nécessaire au déplacement de la plaque.

Après le malaxage, le béton est introduit dans coffrage en trois couches successives. Chaque couche est vibrée suivant la norme. Le béton est ensuite couvert afin d'éviter d'éventuelles fuites ou perte de pression. L'application de la pression sur l'échantillon du béton s'effectue par palier à l'aide d'une presse hydraulique qui transmet la charge sur un cylindre placé. L'incrément de la charge est adapté à la vitesse du remplissage du coffrage. La vitesse de translation retenue lors des essais est de 5 mm/min ce qui permet de simuler les vitesses réelles de tassement du béton frais sous son propre poids dans les coffrages. L'essai dure 1 minute environ pour chaque pression de contact.

La contrainte normale du béton sur la plaque métallique $\sigma_h(t)$ est déduite des forces F_{h1} et F_{h2} . Le coefficient de frottement est ainsi calculé à partir de la contrainte $\sigma_h(t)$ et de la force de frottement F_{r1} appliquée sur la surface de contact plaque/béton notée $A_{contact}$ à partir de l'équation suivante :

$$\mu(t) = \frac{F_{r1}}{A_{contact} \sigma_h(t)} \quad \text{I-7}$$

Il est à noter que dans ce dispositif, l'aire de contact diminue avec le temps au cours de l'essai. Par conséquent, contrairement à ce que fait apparaître l'équation ci-dessus donnée par Proske [11], la grandeur $A_{contact}$ est également une fonction du temps.

Le frottement mobilisé à la paroi du coffrage est également considéré par d'autres auteurs comme Kwon et al [9] (Figure I-7-a). Dans cette étude la contrainte de frottement est déduite des mesures de poussées latérales du béton dans un coffrage circulaire en PVC. Trois diamètres ont été retenus dans cette étude : 130 mm, 180 mm et 280 mm. Des capteurs de pression sont placés sur la paroi du tube (PL1, PL2 et PL3) et en partie inférieure (PB1) afin de déterminer la pression verticale exercée par la colonne de béton. La position des capteurs est donnée à la Figure I-7-b.

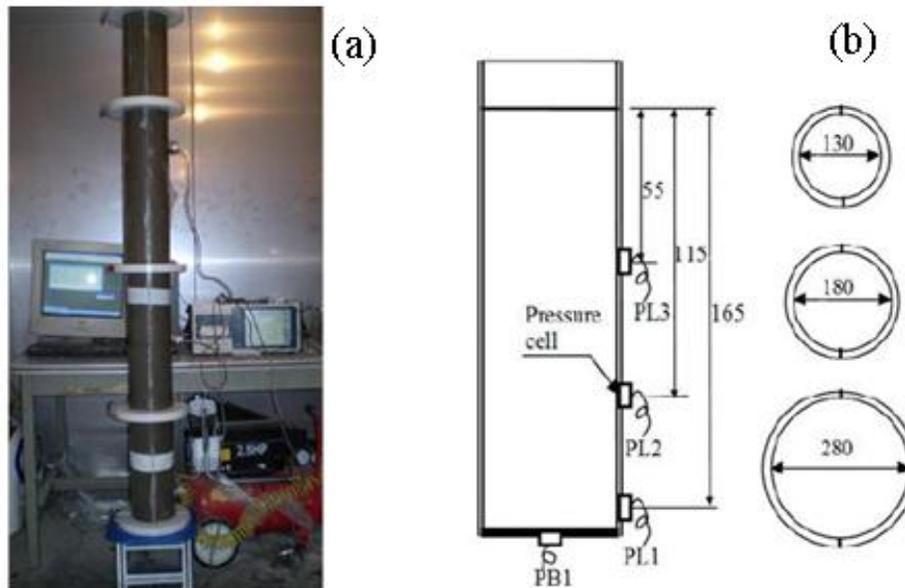


Figure I-7 : Mesure du frottement et de la pression du béton sur le coffrage [9].

Selon Kwon et al [9], pour un système sans frottement sur les parois du tube, le capteur PB1 doit enregistrer la pression hydrostatique du béton. Si la valeur enregistrée est inférieure, la différence est attribuée à la contrainte de frottement mobilisée à la paroi. La contrainte de frottement est calculée à partir des équations suivantes selon deux cas :

Cas 1 : au cours du bétonnage

$$\tau_{FA}(t) = \frac{D}{4} \left(\rho g - \frac{\sigma_{v, fond}(t)}{h(t)} \right) \quad \text{I-8}$$

Où D est le diamètre du tube en m, ρ la masse volumique absolue du béton en kg/m^3 , $\sigma_{v, fond}$ est la contrainte verticale exercée à la base du tube en kPa et h la hauteur de béton dans le tube en m.

Cas 2 : fin du bétonnage

$$\tau_{FA}(t) = \frac{D}{4} \left(\rho g - \frac{\sigma_{v, fond}(t)}{H} \right) \quad \text{I-9}$$

Avec $h(t) = H$

I.3.2 Etude de l'interface béton/coffrage et béton/huile/coffrage

Le tribomètre plan/plan de Vanhove [10] a permis de mettre en évidence les mécanismes se déroulant à l'interface béton/paroi ou béton/huile/paroi. Cette conception plan/plan avait déjà été proposée par Bleschik [39] en 1977, Tanigawa [40] en 1987 puis par Fujiwara [41] en 1999 pour caractériser rhéologiquement la partie du béton proche de la paroi.

L'appareil conçu par Bleschik [39] est basé sur le principe de la boîte de cisaillement « plan/plan » qui consiste à faire glisser une plaque métallique en contact avec un béton. Cet appareil permet de déterminer les contraintes de frottement à l'interface béton/paroi pour des bétons plastiques et très fermes. D'après l'auteur ce dispositif peut créer plus facilement un champ de contrainte dans le béton avec une vitesse de cisaillement constante. La Figure I-8 présente le schéma de cet appareil.

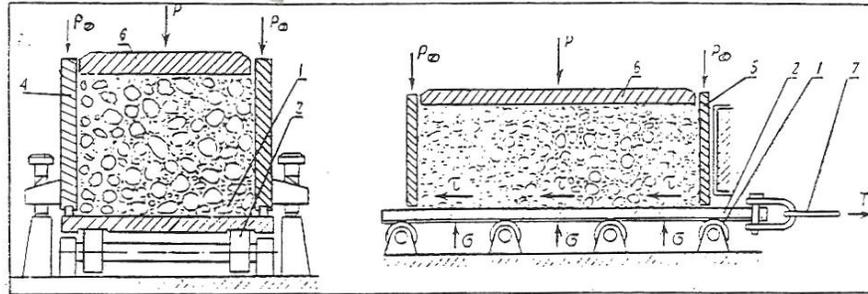


Figure I-8 : Schéma de l'appareil de Bleschik [39].

La pression appliquée au matériau peut s'effectuer soit par paliers soit de façon continue. La mesure de la pression dans le béton se fait au moyen de capteurs à membrane placés sur les parois du moule, près du plan de cisaillement.

Cet appareil ne peut pas être utilisé pour l'étude des bétons fluides car les contraintes de frottement générées par le contact de la boîte et la plaque métallique risquent d'être supérieures à celles du béton.

Le principe de l'appareil développé par Tanigawa [40] est simple, son système est inversé par rapport à celui proposé par Bleschik (Figure I-9). L'essai consiste à placer un échantillon de béton frais dans une boîte de 100*100 de section et de 200 mm de hauteur sur une plaque métallique immobile qui simule le coffrage. Les pressions appliquées au matériau en contact varient entre 1.12 et 2.23 kPa. La vitesse de déplacements est constante comprise entre 10 et 50 mm/s. Un capteur de force permet d'obtenir la force de cisaillement. Cette force est enregistrée en fonction du temps.

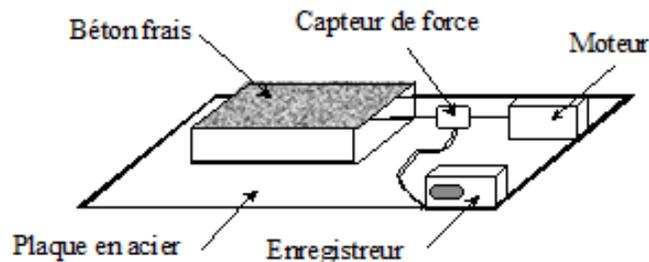


Figure I-9 : Appareil de Tanigawa [40].

En 1999, suite à la nécessité de caractériser les bétons autoplaçants nouvellement apparus, Fujiwara a mis au point un dispositif pour mesurer les contraintes de frottement entre une plaque en acier et un béton autoplaçant (Figure I-10). Il s'agissait de déterminer le frottement de ces bétons survenant lors de leur caractérisation dans des U-shaped ou gutter shaped.

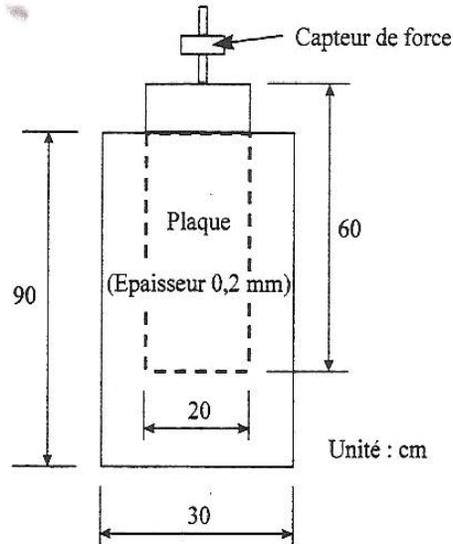


Figure I-10 : Essai de frottement de Fujiwara et al [41].

Le principe du dispositif consiste à introduire une plaque métallique dans un récipient de 30 cm de largeur et 90 cm de hauteur, rempli de béton. La plaque métallique a une hauteur de 60 cm et une largeur de 30 cm. La vitesse de glissement de la plaque métallique peut varier en 0 et 30 mm/s. la force de frottement est mesurée au moyen d'un capteur de force.

Tous les appareils cités sont limités en gamme de pression de contact à quelques pascals alors que dans la réalité le béton exerce sur les parois des coffrages, une pression pouvant atteindre plusieurs kilopascals. Ces dispositifs ne peuvent donc pas simuler les conditions réelles de chantier lors de la mise en œuvre des bétons dans les coffrages. Par contre, le tribomètre construit par Vanhove [10] [42], peut atteindre des pressions jusqu'à 1700 kPa pour les bétons traditionnels et 400 kPa pour les bétons autoplaçants.

Vanhove [10] est le premier à avoir utilisé son dispositif pour étudier l'influence des paramètres d'interface tels que la rugosité de la plaque, la vitesse de glissement ou la nature des huiles de décoffrage. Il a proposé un modèle mécanique pour comprendre les phénomènes se déroulant à l'interface béton/paroi. Puis, Libessart [1], en 2006 a utilisé cet appareil pour prédire le comportement de l'interface béton/huile/coffrage en fonction de la nature des huiles de décoffrage.

I.3.3 Etude de l'interface béton/paroi lors du pompage des bétons

Le pompage du béton est une technique de mise en place du béton frais utilisée depuis plusieurs années. Elle consiste à pomper, par l'intermédiaire d'une pompe (Figure I-11), le béton dans une tuyauterie. Pour éviter le problème de blocage dans les conduites, on fait précéder le béton d'une section remplie d'une barbotine constituée d'un coulis de ciment, que l'on évacue une fois le circuit intégralement amorcé.

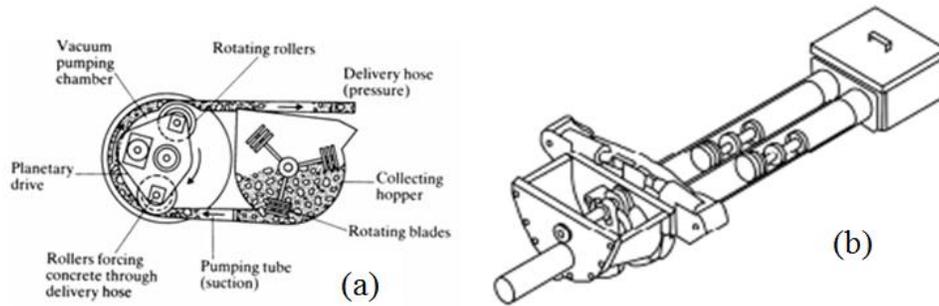


Figure I-11 : Mécanisme d'une pompe péristaltique et (b) Mécanisme d'une pompe hydraulique à deux pistons [43].

Au cours de cette opération, plusieurs problèmes peuvent être rencontrés en raison de la formation des bouchons et de la perte de charge dans les conduites. Ces phénomènes provoquent un arrêt complet du chantier et par conséquent une perte financière importante. En régime permanent, le béton s'écoule le plus souvent en bloc, et son glissement est facilité par la formation d'une couche limite à l'interface béton/paroi, riche en éléments fins et dans laquelle se produit le cisaillement. Au début du processus de pompage, le béton n'est pas cisailé dans les tuyauteries. Il avance par glissement grâce à la couche limite formée à l'interface béton/paroi. Ce qui signifie que les frottements à l'interface béton/acier jouent un rôle important pour les paramètres de pompage et la pompabilité des bétons. La connaissance du comportement tribologique de cette couche limite permet donc de prévoir la résistance au pompage du béton.

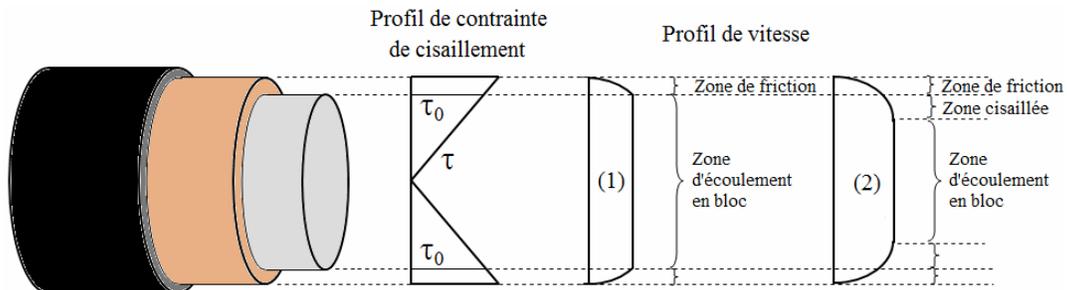


Figure I-12 : Ecoulement du béton dans les tuyaux de pompage [29] [14].

C'est en 1957 qu'a été construit le premier appareil qui a permis de déterminer la relation entre la pression radiale et la pression axiale, et de mesurer les frottements à l'interface

béton/paroi dans le cas de pompage (Figure I-13). Ede [44] a conçu un dispositif expérimental qui consiste à mettre verticalement un cylindre métallique rempli de béton frais mis en pression à l'aide des pistons. Les mêmes caractéristiques de la paroi des tuyaux de pompage ont été reproduites pour le cylindre. A l'aide de cet appareil, la pression appliquée sur le béton frais peut atteindre jusqu'à 1000 kPa environ.

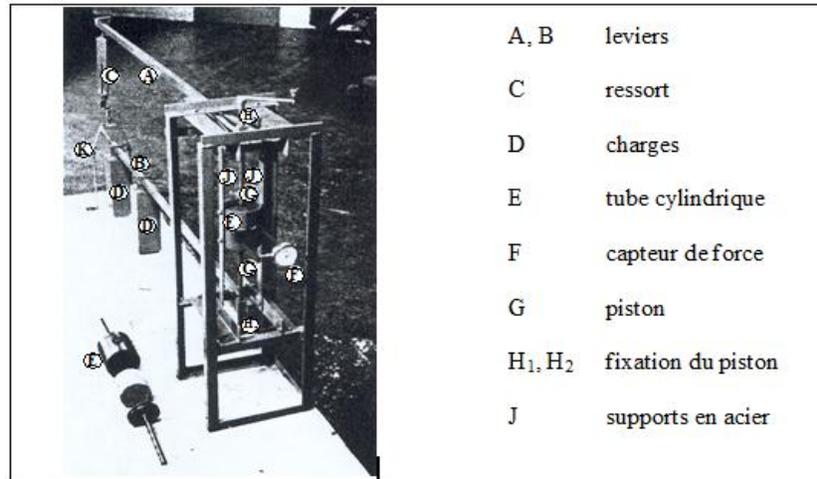


Figure I-13 : Etude du frottement béton/paroi- Cas de pompage des bétons frais selon Ede [44].

L'essai consiste à mettre en pression le levier inférieur (B) pour empêcher tout déplacement du piston. Après l'introduction du béton dans le cylindre, le piston supérieur est mis dans le cylindre. Le levier supérieur est ensuite libéré pour démarrer l'essai. Ce dispositif permet également d'étudier l'évolution des contraintes de frottement en fonction de la vitesse de glissement. Dans cette configuration, la vitesse de glissement dépend de la pression appliquée au matériau.

En 1960, Best et Lane [45] ont mis au point un essai qui a permis de déterminer les paramètres de frottement à l'interface béton/tuyau (Figure I-14). Les essais effectués sur ce dispositif ont été validés par des résultats obtenus avec un circuit de pompage équipé de tuyaux de 150 mm de diamètre.

L'appareil est composé d'un cylindre hydraulique par l'intermédiaire duquel une pression homogène est appliquée sur le béton dans un cylindre de 250 mm de diamètre. A l'extrémité du cylindre, le béton doit passer dans une réduction elliptique de la section initiale de 16%. La vitesse du piston est de 25 mm/s.

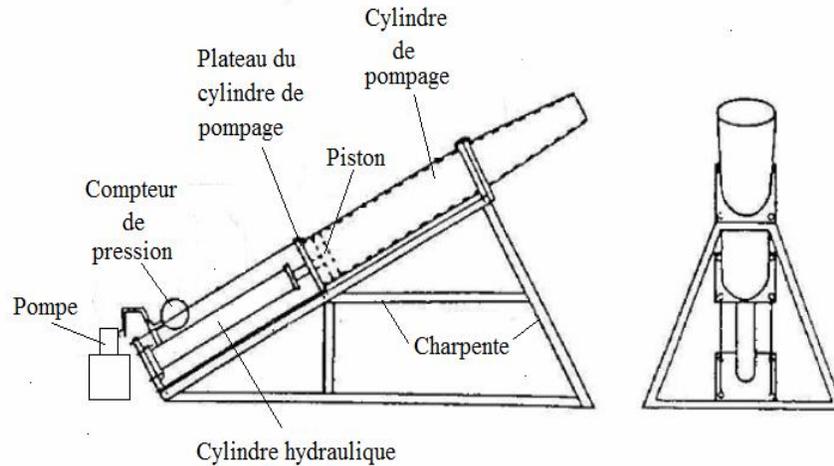


Figure I-14 : Appareil de mesure de la pression de pompage de Best et Lane

Les résultats obtenus à l'aide de cet essai ont montré que les frottements béton/paroi augmentent lorsque la teneur en eau est très faible dans un béton frais et que la ségrégation est principalement provoquée par un excès de teneur en eau.

Les essais effectués par Morinaga en 1973 [46] avaient pour but d'estimer les contraintes de frottement engendré lors du passage du béton dans les conduites de pompage, grâce à un appareil développé qui reproduit les conditions réelles de pompage (Figure I 11). L'appareil comprend un tube de 50 mm de diamètre, d'une longueur de 2 mètres de longueur posé sur un roulement. Après la mise en place du béton, la pression est appliquée par l'injection de l'air comprimé dans le tuyau à l'aide de la chambre pressurisée avec l'air. La contrainte de frottement à l'interface béton/paroi est mesurée à l'aide d'un capteur de force qui mesure la force nécessaire pour garder le tuyau immobile.

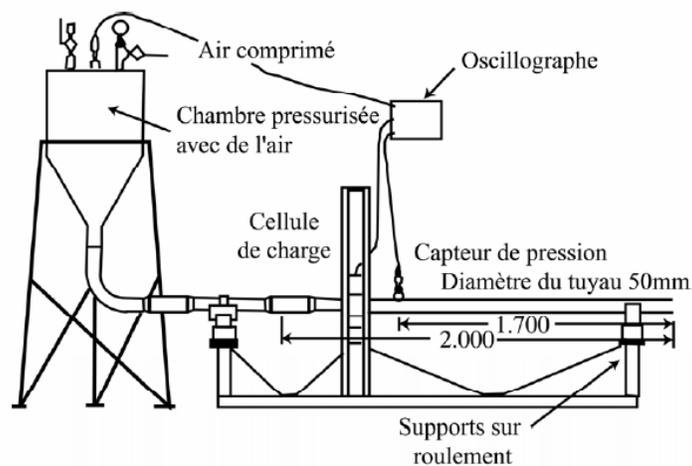


Figure I-15 : Appareil de mesure du frottement développé par Morinaga [46].

Une loi de frottement de l'interface béton/paroi a été proposée afin de décrire les frottements le long de la paroi du tuyau :

$$f = k_1 + k_2 v \quad \text{I-10}$$

Où :

f est le coefficient de frottement, k_1 et k_2 représentent respectivement le coefficient d'adhésion et le coefficient de vitesse, et v est la vitesse du béton.

Pour le projet national CALIBE (pompage des bétons), le laboratoire des Ponts et Chaussées a modifié le BTRhéom [47] (rhéomètre à béton) pour pouvoir mesurer les paramètres d'interface définis par Kaplan [29] : contraintes à l'interface béton/paroi y compris la contrainte seuil et la constante de visqueuse d'interface. La loi de frottement proposée est la suivante :

$$\tau_{surface} = \tau_{0i} + \eta_i V \quad \text{I-11}$$

Où

$\tau_{surface}$: contrainte tangentielle ou friction (Pa),

V : vitesse (m/s),

τ_{0i} : seuil de cisaillement de l'interface (Pa),

η_i : viscosité d'interface (Pa.s/m).

Le principe de cet appareil également appelé tribomètre reprend celui des viscosimètres coaxiaux. Le béton (13 litres) est placé dans une gamelle de 350 mm de diamètre et de 120 mm de hauteur. Un cylindre tournant de 150 mm, placé à l'intérieur de la gamelle donne un entrefer de 100 mm. La plage de vitesse est comprise entre 0.2 et 1.6 tours/s.

La rotation du cylindre intérieur entraîne la formation d'une couche limite de coulis à l'interface acier/béton.

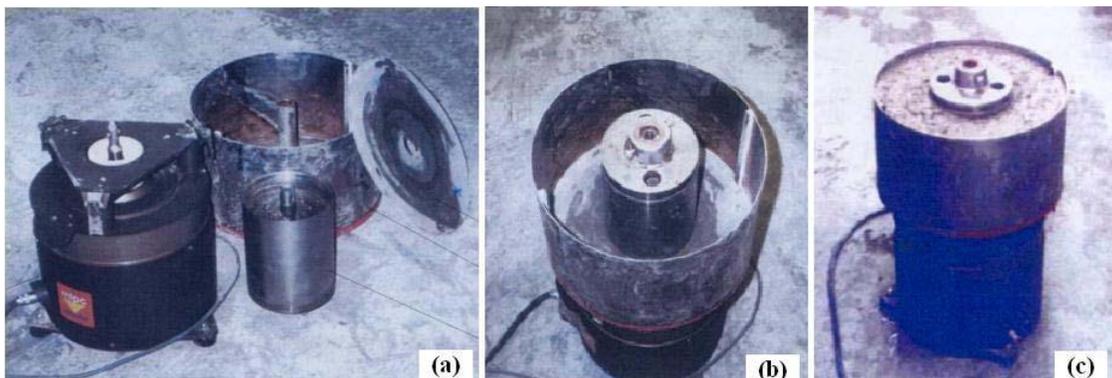


Figure I-16 : Tribomètre à cylindres coaxiaux de Kaplan : (a) composants du tribomètre ; (b) tribomètre vide ; (c) tribomètre rempli de béton [29].

Un autre tribomètre développé par Chapdelaine en 2007 [43] permet de déterminer les propriétés rhéologiques à l'interface béton/paroi du béton frais. Cet appareil est en fait une adaptation du rhéomètre IBB.

Une cuve de même dimension que celle du rhéomètre IBB a été utilisée. Pour empêcher tout mouvement du béton lors de l'essai, la cuve comporte des pales fixes de 12 mm de largeur qui ont été placées sur les parois internes, au fond et en porte-à-faux au centre de la cuve. Le tribomètre est également équipé d'un cylindre creux qui représente la partie mobile (Figure I-17-b).



Figure I-17 : (a) Croquis du tribomètre, (b) vue générale avec tribomètre en caoutchouc et (c) vue de près avec tribomètre en acier en mouvement [43].

Trois hypothèses ont été posées afin de réaliser ce tribomètre :

- les propriétés de la couche limite ou lubrifiante formée par le mouvement du tribomètre sont les mêmes que celles formées lors du pompage dans un boyau;
- l'épaisseur de la couche lubrifiante est identique dans le boyau et en périphérie de la paroi;
- l'effet de la pression sur le volume d'air est négligeable et les propriétés rhéologiques et tribologiques sont peu affectées.

La séquence des vitesses angulaires imposées utilisée est similaire à celle habituellement programmée pour l'essai rhéologique. La vitesse de rotation du tribomètre augmente graduellement jusqu'à environ 1 tour/seconde, en plusieurs paliers d'une durée de 10 secondes. La vitesse du cylindre diminue ensuite progressivement, toujours par palier, jusqu'à l'arrêt complet. Les données de couple et de la vitesse sont utilisés pour le calcul du seuil de l'interface (G_i) et la viscosité d'interface (H_i).

La contrainte tangentielle aux surfaces (ou friction) est égale au couple divisé par le rayon divisé par la surface :

$$\tau_{surface} = \frac{c}{4\pi R^2 h} \quad \text{I-12}$$

Où :

R : rayon moyen du cylindre tribologique (m),

C : couple mesuré (Nm) ;

h : hauteur du cylindre immergé dans le béton (x2 faces du cylindre).

Le seuil de l'interface et la viscosité plastique se calcule à l'aide des équations suivantes :

$$\tau_{0i} = \frac{G_i}{4\pi R^2 h} \quad \text{I-13}$$

$$\eta_i = \frac{H_i}{8\pi^2 R^3 h} \quad \text{I-14}$$

Dans une étude plus récente (2009) réalisée par Ngo [14], un tribomètre a été développé. Il reprend le principe des rhéomètres à cylindres coaxiaux (Figure I-18). Le principe consiste à mettre en rotation à différentes vitesses une pièce cylindrique en acier lisse dans un récipient cylindrique rempli de béton frais. A la fin de l'essai, les couples de frottement requis à l'interface pour maintenir la rotation du cylindre sont enregistrés. Au cours de l'essai, une couche limite, se forme à l'interface du cylindre tournant et le béton : le mouvement entraîné par le cylindre tournant provoque un dégagement des gros graviers voisins vers l'intérieur de l'échantillon. Pour remplir les vides laissés par des graviers, des particules fines se loge à l'interface béton/paroi. Le cisaillement se fait donc dans une couche composée d'éléments fins. Cet appareil se compose d'un récipient cylindrique de 300 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur. A l'intérieur de ce cylindre, un second cylindre de 100 mm de hauteur et de 107 mm de diamètre est relié à un agitateur à régulation électronique de vitesse permettant l'enregistrement d'un couple.

La procédure expérimentale consiste dans un premier temps à remplir la moitié de la hauteur du récipient du matériau. Le béton est ensuite piquer 25 coups avec une tige. Le cylindre au centre est mis en contact avec la surface du béton. A l'aide d'un logiciel, la rotation du cylindre est piloté avec un profil de vitesse imposé pour enregistré le couple de frottement correspondant à chaque palier de vitesse chaque 2 seconde. Les vitesses de rotation du cylindre sont comprises dans une plage entre 0,2 et 1,6 tr/s.

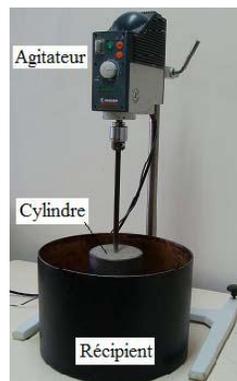


Figure I-18 : Tribomètre à cylindres coaxiaux de Ngo [14].

Dans un deuxième temps, le récipient est rempli de béton jusqu'à l'arase pour être piqué 25 coups au moyen d'une tige. Le cylindre est mis en rotation en utilisant le même protocole

précédent. Le couple de frottement à l'interface béton/paroi est ensuite déduit par la différence entre les deux mesures. Le calcul des frottements à l'interface béton/paroi n'intègre donc pas les frottements de la partie inférieure.

Le seuil d'interface et la constante visqueuse peuvent être directement calculés à l'aide de ces deux équations sans mesurer les paramètres rhéologiques.

$$\tau_0 = \frac{T_0}{2\pi R^2 h} \quad \text{I-15}$$

$$\eta = \frac{\kappa}{4\pi^2 R^3 h} \quad \text{I-16}$$

Avec :

τ_0 : seuil d'interface en (Pa) ;

η : constante visqueuse en (Pa. $\frac{s}{m}$) ;

R : rayon moyen du cylindre en (m) ;

κ : coefficient de régression linéaire en (N.m. $\frac{s}{rad}$) ;

h : hauteur du cylindre en (m).

Dans cette étude, une méthode indirecte a été mis au point pour prélever la couche limite afin d'obtenir des données sur la composition de cette couche.

I.4 Conclusion

L'ensemble des tribomètres cités dans ce chapitre répondent à un cahier des charges précis en fonction des applications industrielles visées. Un grand nombre de ces appareils ont été développés afin d'étudier le frottement rencontré lors du pompage des bétons. Le Tableau I-1 présente l'ensemble des appareils répertoriés dans le cadre de cette étude. Le nombre important d'appareils dédiés au pompage est lié à la complexité du phénomène mis en jeu (frottement béton/tuyau). A l'interface béton/tuyau, une fine couche de matériau constituée d'eau et de fines provenant du béton joue le rôle de lubrifiant permettant un meilleur écoulement du béton dans le tuyau. Cette lubrification peut également être obtenue suite à l'injection d'une barbotine (mélange eau +ciment) avant le passage du béton. La plupart des appareils ont été développés dans le but de caractériser cette couche de matériau proche de la paroi qui conditionne la pompabilité d'un béton. Des grandeurs sont ainsi définies comme le seuil ou la viscosité d'interface. Mais, ces termes de seuil et de viscosité restent des grandeurs propres à une approche rhéologique.

	Domaine d'étude	Principe	Paramètres imposés	Paramètres mesurés	Paramètres d'étude
Appareil d'Ede (1957)	Pompage	Cylindre/Cylindre	Pression	Pression radiale Vitesse de cisaillement	Composition du béton Pression
Appareil de Best et Lane (1960)	Pompage	Cylindre/Cylindre	Pression Vitesses du béton	Contrainte de frottement Energie de compression du béton	Composition du béton Pression Vitesses du béton
Appareil de Morinaga (1973)	Pompage	Cylindre/Cylindre	Pression Vitesse du béton	Contrainte de frottement	Composition du béton Pression Vitesse du béton
Appareil de Bleschik (1977)	Pompage Frottement béton/coffrage	Plan/Plan	Pression par palier Vitesses de glissement	Contrainte de frottement	Composition du béton Pression Vitesses de glissement
Appareil de Tanigawa (1987)	Pompage Frottement béton/coffrage	Plan/Plan	Pression, Vitesses de glissement	Contrainte de frottement	Composition du béton Pression, Vitesses de glissement
Tribomètre de Djelal (1991)	Frottement argile/paroi (Extrusion)	Plan/Plan	Pression Vitesses de glissement	Contrainte de frottement Coefficient de frottement	Pression de contact Vitesses de glissement
Tribomètre de Beaumel (1998)	Frottement argile/paroi Argile sableuse/paroi (Extrusion)	Plan/Plan	Pression Vitesses de glissement	Contrainte de frottement Coefficient de frottement	Pression de contact Vitesses de glissement
Tribomètre de Vanhove (1998)	Frottement béton/coffrage	Plan/Plan	Pression Vitesses de cisaillement	Contrainte de frottement Coefficient de frottement	Composition du béton Pression de contact Vitesse de bétonnage Huiles de décoffrage
Appareil de Fujiwara (1999)	Loi rhéologique d'interface Frottement béton/coffrage	Plan/Plan	Vitesses de cisaillement Volume du béton	Contrainte de frottement	Composition du béton Vitesses de glissement
Tribomètre de Kaplan (1999)	Pompage	Rotatif	Vitesse de rotation	Seuil d'interface Constante visqueuse	Composition du béton
Tribomètre de Chapdelaine (2007)	Pompage	Rotatif	Vitesse de rotation	Seuil d'interface Viscosité d'interface	Composition du béton Nature de la paroi
Tribomètre de Proske (2007)	Frottement béton/coffrage	Plan/Plan	Pression Vitesses de cisaillement	Contrainte de frottement Coefficient de frottement	Composition du béton Pression Vitesses de glissement
Tribomètre de Ngo (2009)	Pompage	Rotatif	Vitesse de rotation	Seuil d'interface Constante visqueuse	Composition du béton
Dispositif de Kim (2010)	Frottement béton/coffrage	Plan/Plan	Pression	Contrainte de frottement	Composition du béton Vitesse de bétonnage

Tableau I-1 : Tribomètres et appareils de frottement.

En vue d'étudier le comportement tribologique des interfaces béton/huile/coffrage et l'influence de la composition du béton sur la contrainte de frottement, le tribomètre plan/plan développé par Vanhove et al [42] dont le principe a été repris par Proske [11] sera utilisé pour cette étude. Cet appareil, très sensible aux variations des conditions d'interface, permet de faire varier un grand nombre de paramètres et d'analyser le comportement physico-chimique du matériau.

Chapitre II:

Les matériaux

II.1 Introduction

Le béton est généralement considéré comme un milieu bi-phasique en considérant l'eau, le ciment et les éventuelles additions et adjuvants comme la pâte du béton et le sable associé aux gravillons comme le squelette granulaire. Pour comprendre le mode d'action du volume de pâte et du dosage en superplastifiant sur les propriétés tribologiques à l'interface béton/coffrage, une série de bétons a été confectionnée.

Dans un premier temps, la composition des bétons, les protocoles de malaxage et les caractéristiques de chaque constituant employé ont été présentés. Dans un second temps, une caractérisation complète a été effectuée en menant des essais d'ouvrabilité et de teneur en air occlus. Une caractérisation rhéologique a été également réalisée afin de déterminer la viscosité plastique et le seuil de cisaillement en fonction du volume de pâte et du dosage en superplastifiant.

II.2 Formulation des bétons

L'effet du volume de pâte a été étudié en formulant quatre bétons ordinaires possédant 28, 30, 32 et 34% de pâte, respectivement B28, B30, B32 et B34, avec un rapport Eau/Liant (E/L) et Gravillons/Sable (G/S) constant.

Afin d'étudier d'éventuelles interactions entre les huiles de démoulage, l'adjuvant et le béton lors de la mise en œuvre de ce dernier, quatre bétons adjuvantés à différent dosages en superplastifiant et un béton autoplaçant (BAP) possédant 36% de pâte ont été étudiés. Les formulations retenues sont données dans le Tableau II-1.

Bétons	B28	B30	B32	B34	B30A1	B30A2	B34A1	B34A2	BAP
Volume de pâte (%)	28	30	32	34	30	30	34	34	36
Ciment CEM I 52,5 CP2 (kg/m ³)	232	248	265	282	269	294	306	333	367
Filler calcaire (kg/m ³)	77	83	88	94	90	98	102	111	92
Sable de l'Oise 0/4 (kg/m ³)	838	815	792	768	815	815	768	768	751
Gravillon concassé 4/8 (kg/m ³)	287	279	271	263	279	279	712	712	243
Gravillon concassé 8/12,5 (kg/m ³)	778	756	734	712	756	756	263	263	658
SP GLENIUM 27 (% de ciment)					0,7	1,14	0,68	1	1,64
Eau (l)	176	189	201	214	179	169	204	191	206
Rapport (E/L)	0,57	0,57	0,57	0,57	0,5	0,43	0,5	0,43	0,49

Tableau II-1 : Composition des bétons.

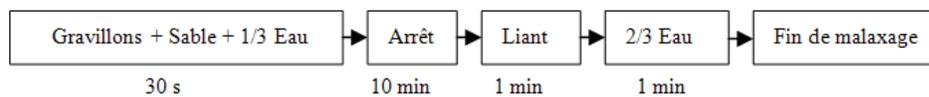
Les bétons adjuvantés ont été formulés à base des deux bétons ordinaires B30 et B34. Le dosage en superplastifiant a été ajusté de manière à conserver la même ouvrabilité (classe S3) entre ces quatre bétons. Pour cela, le rapport E/L a été modifié entre le premier ajustement du

superplastifiant A1 et le deuxième ajustement A2. Les rapports massiques Ciment/Filler et Gravillon/Sable (G/S) ont été maintenus constants pour les quatre compositions.

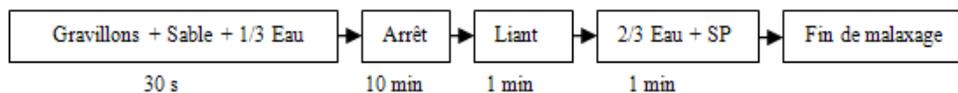
II.2.1 Malaxage du béton

La confection des bétons nécessite un mode de malaxage bien défini. Dans le cas de cette étude, la norme NF P 18-404 intitulée « Bétons – Essais d'étude, de convenance et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes » et les recommandations de la fiche technique du superplastifiant (Annexe 1) ont été prises en compte. La procédure de malaxage a été effectuée à partir de matériaux secs suivant ces deux protocoles :

Pour les bétons ordinaires



Pour les bétons adjuvés et le béton autoplaçant (BAP)



Le temps de repos de 10 min correspond au temps d'absorption de l'eau par les granulats. Cette précaution permet d'éviter une altération des propriétés rhéologiques du béton quelques minutes après la fin du malaxage. Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est de type DIEM DZ120V. Il est équipé de plusieurs pales afin d'optimiser le malaxage. Des gâchées de 25 litres ont été réalisées pour chaque essai tribologique.

II.3 Les constituants des bétons

II.3.1 Les granulats

Les granulats (sable et gravillons) constituent le squelette granulaire du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment de l'eau et de l'air. Ils proviennent généralement des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est justifiée par leur faible coût volumique, par leur meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais [48] [49]. La dimension de ces granulats varie de moins d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètres. La norme française XP P 18-101 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- les fines 0/D avec $D \leq 0,063$ mm ;
- les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm ;

- les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm ;
- les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm ;
- les graves 0/D avec $6,3$ mm $< D \leq 80$ mm ;

Dans le cas de cette thèse les granulats utilisés sont :

- un sable 0/4,
- un gravillon 4/8
- un gravillon 8/12,5

Pour obtenir une formulation répondant au cahier des charges, des essais de caractérisation ont été effectués en laboratoire. Ces essais concernent les masses volumiques absolue et apparente, la propreté (équivalent de sable) et le coefficient d'absorption du sable ainsi que l'analyse granulométrique. Les caractéristiques des granulats retenus sont données dans le Tableau II-2. Les résultats obtenus montrent que le sable est très propre (absence presque totale de fines argileuses) et peut être utilisé sans risque dans la composition d'un béton.

Granulats	Sable	Gravillon 4/8	Gravillon 8/12,5
Masse volumique apparente (t/m ³)	1,49	1,42	1,45
Masse volumiques absolue (t/m ³)	2,57	2,72	2,6
Coefficient d'absorption	0,8	-	-
ES (%)	97,38	-	-

Tableau II-2 : Caractéristiques des granulats.

Les courbes granulométriques sont données dans la Figure II-1. Elles permettent de déterminer la taille et le pourcentage pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant le béton.

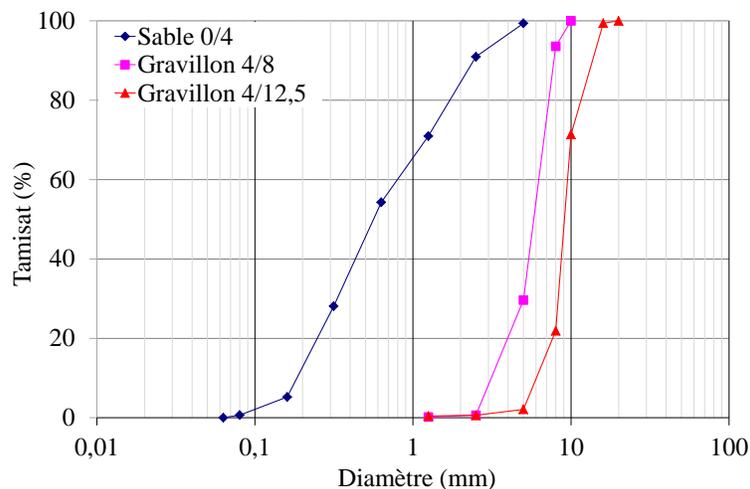


Figure II-1 : Courbes granulométriques des granulats utilisés.

Le module de finesse (F_M) du sable est déduit à partir de sa courbe granulométrique. Sa valeur est de 2,51. Les granulats utilisés ne présentent pas de discontinuité granulaire. Le

diamètre maximal des granulats est de 12,5 mm. Le sable ne possède pas de fines pour un passant inférieur à 63 μm .

II.3.2 Le ciment et additions calcaires

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange fluide en un corps solide. Le ciment retenu pour notre étude est le CEM I 52,5 N CP2. Les caractéristiques physiques et mécaniques et la composition chimique sont données dans l'Annexe 2. Selon l'analyse granulométrique de la Figure II-2, le ciment utilisé possède une taille maximale de grains de 60 μm . De plus, selon l'histogramme associé à la courbe, les grains de diamètre 20 μm sont les plus représentés à hauteur de 3,4% par rapport au volume de ciment étudié. Il est à noter également que 80% des grains sont inférieurs à cette valeur de 20 μm .

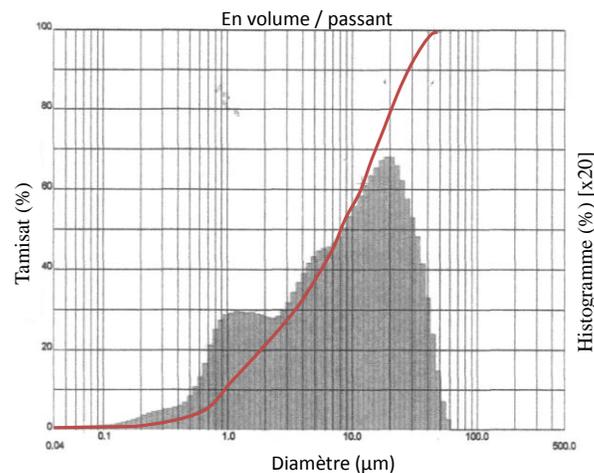


Figure II-2 : Distribution de la taille des grains de ciment.

Pour la confection des bétons, un filler calcaire est incorporé dans les mélanges. Il se présente sous forme d'une poudre fine que l'on obtient en concassant et en broyant de la pierre calcaire. Dans un béton, le filler calcaire est inerte et participe au remplissage des interstices laissés par les granulats plus grossiers. Il donne une meilleure optimisation du squelette granulaire et contribue ainsi à l'augmentation de la résistance du mélange à la compression. Les avantages que présente l'utilisation de notre filler calcaire sont les suivants :

- diminution du dosage en ciment pour une résistance donnée,
- démoulage immédiat aisé pour les produits préfabriqués,
- limitation du ressuyage,
- augmentation de la cohésion

Dans cette thèse, le filler calcaire utilisé est commercialisé sous le nom de BETOCARB-MQ. Il a été fourni par le groupe CEMEX. La fiche technique (Annexe 3) indique qu'il est essentiellement composé de carbonate (99,3%). Les analyses granulométriques des ciments et du filler calcaire ont été respectivement réalisées par le groupe CEMEX. La Figure II-3 montre l'analyse granulométrique du filler calcaire issue de la fiche technique (Annexe 3).

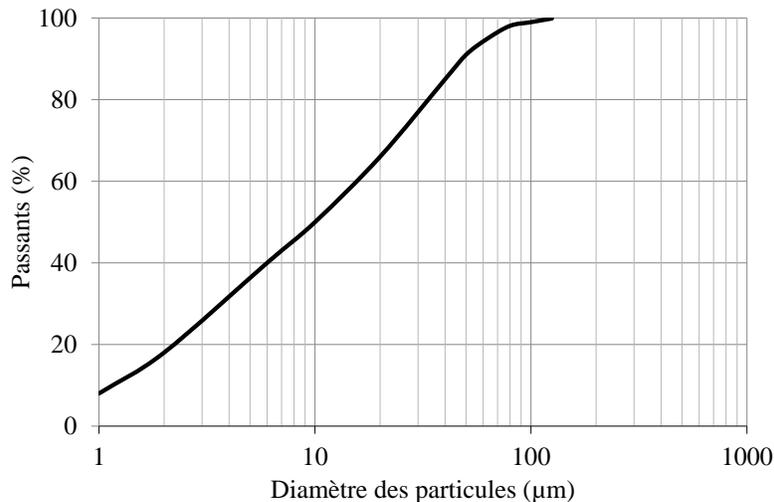


Figure II-3 : Distribution de la taille des grains du filler calcaire.

La courbe granulométrique présente une taille maximale des grains de 80 µm. Le pourcentage de passant cumulé, au-delà de cette valeur, n'est pas significatif. Pour conclure cette analyse, les grains de diamètre inférieur à 20 µm représentent 63% du volume étudié.

II.3.3 L'eau dans le béton

L'eau est l'un des ingrédients essentiels du béton, voire le plus important avec le ciment. En effet l'eau intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques. De plus, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un fluide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. Au cours de la fabrication du béton, l'eau est présentée sous divers états.

- l'eau chimiquement liée : c'est l'eau consommée au cours des réactions d'hydratation, combinée avec d'autres composants dans l'hydratation ;
- l'eau adsorbée : il s'agit principalement des premières couches d'eau soumises au champ des forces superficielles au niveau des surfaces du réseau poreux ;
- l'eau capillaire : elle est constituée de la phase condensée remplissant (par condensation capillaire) le volume poreux au-delà de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques ;

- l'eau libre : elle est constituée de la phase condensée qui n'est plus sous le champ d'influence des forces superficielles (elle est en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane).

II.3.4 Le superplastifiant

Les superplastifiants sont des adjuvants appelés «réducteurs d'eau» qui servent à diminuer la quantité d'eau nécessaire au mélange. Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné. Sans modifier la teneur en eau, ils permettent également une augmentation de l'affaissement (ou l'étalement pour les BAP). Les superplastifiants sont généralement classés en trois groupes :

- Les melamines-sulfonates, superplastifiants mis au point dans les années 70 en Allemagne ;
- Les naphthalènes-sulfonates, superplastifiants développés au Japon à la fin des années 70 ;
- Et, enfin, les superplastifiants dits « de nouvelle génération » apparus dans les années 90 : polyphosphanates, polycarboxylates et polyvinyles. Par rapport aux précédents produits, ces adjuvants s'utilisent à des doses plus faibles, et s'applique à une plus grande variété de ciments.

Dans cette étude, le superplastifiant GLENIUM 27 a été utilisé (Annexe 1). Cet adjuvant non chloré est d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique (PCE). Il permet de réduire le rapport E/C efficacement avec un long maintien de maniabilité. Il améliore le pouvoir dispersant sur les grains de ciment grâce à sa structure chimique qui agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique [50].

II.3.4.1 Répulsion par effet électrostatique

Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes. En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment (Figure II-4). Entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques. Cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation [51].

La défloculation par répulsion électrostatique est plus marquée dans les polymères à structure linéaire et à radicaux court comme le polynaphthalène sulfonate (PNS) et la polymélamine sulfonate (PMS). Les éthers polycarboxyliques (PCE) comme le GLENIUM 27 utilisé dans cette étude, possèdent cet effet de répulsion électrostatique mais vont avoir également de par leur degré de ramification et leur masse molaire un effet stérique.

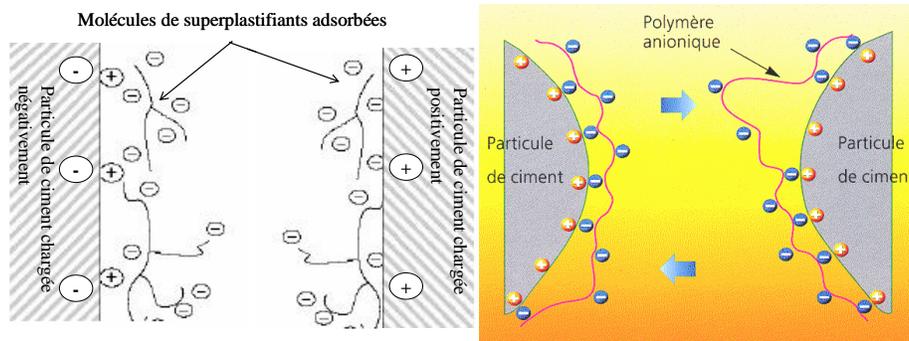


Figure II-4 : Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment de charges contraires munies des molécules du superplastifiant adsorbées sur leur surface [51].

II.3.4.2 Répulsion par effet stérique

Les polymères anioniques s'adsorbent sur la surface des particules de ciment et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours (Figure II-5). Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela engendre l'apparition d'une pression osmotique qui maintient les particules séparées les unes des autres [51]. L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères.

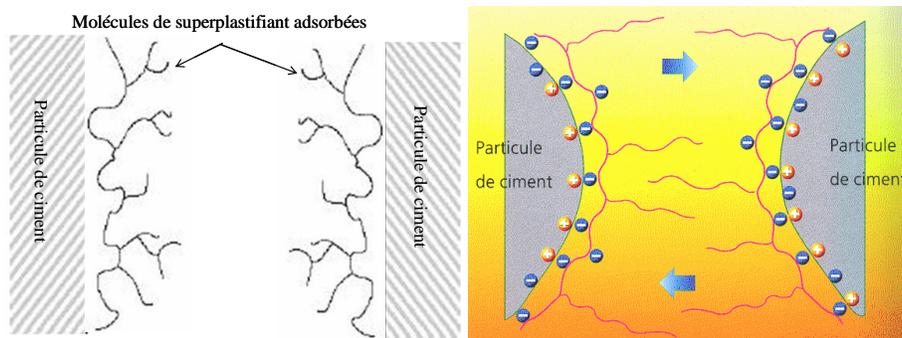


Figure II-5 : Répulsion stérique entre les molécules du superplastifiant adsorbées sur deux grains de ciment [51].

II.3.5 Proportions des constituants

II.3.5.1 Bétons ordinaires sans adjuvants

Le pourcentage en volume de chaque constituant pour les quatre bétons ordinaires est représenté sur la Figure II-6. Ces pourcentages permettent d'apprécier les proportions des différents constituants des mélanges. Les quatre bétons étudiés ont été formulés avec des rapports

(G/S) et (E/L) constants ce qui entraîne une diminution du pourcentage des granulats lorsque le volume de pâte augmente.

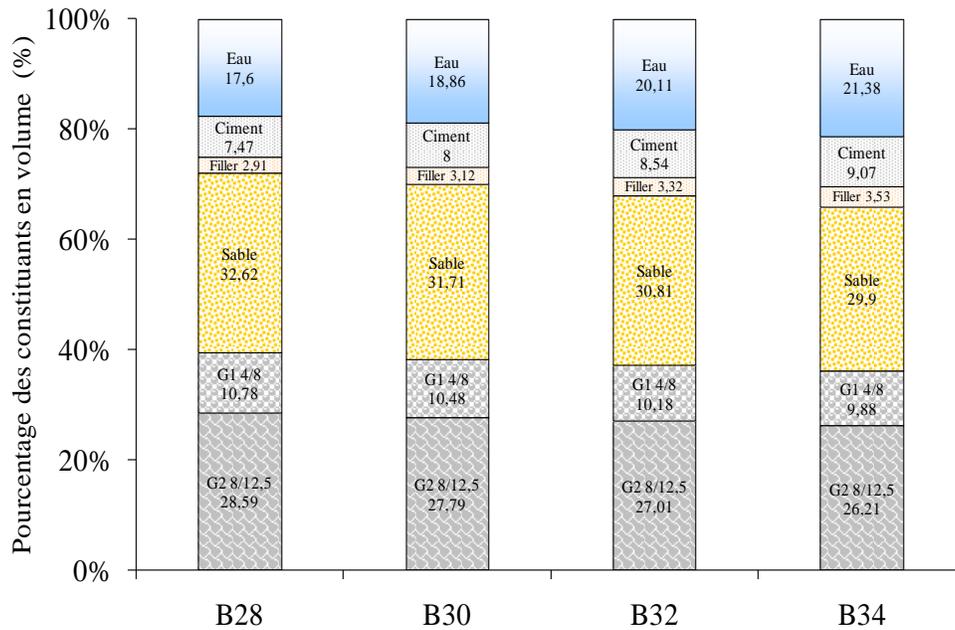


Figure II-6 : Proportion des constituants pour les bétons ordinaires.

Compte tenu de la granulométrie du ciment et du filler calcaire, le volume de pâte est composé uniquement pour sa phase solide de grains inférieurs à 80 μm . Afin de mieux se rendre compte des proportions des constituants contenus dans le volume de pâte du béton, la Figure II-7 représente le pourcentage de ces fines.

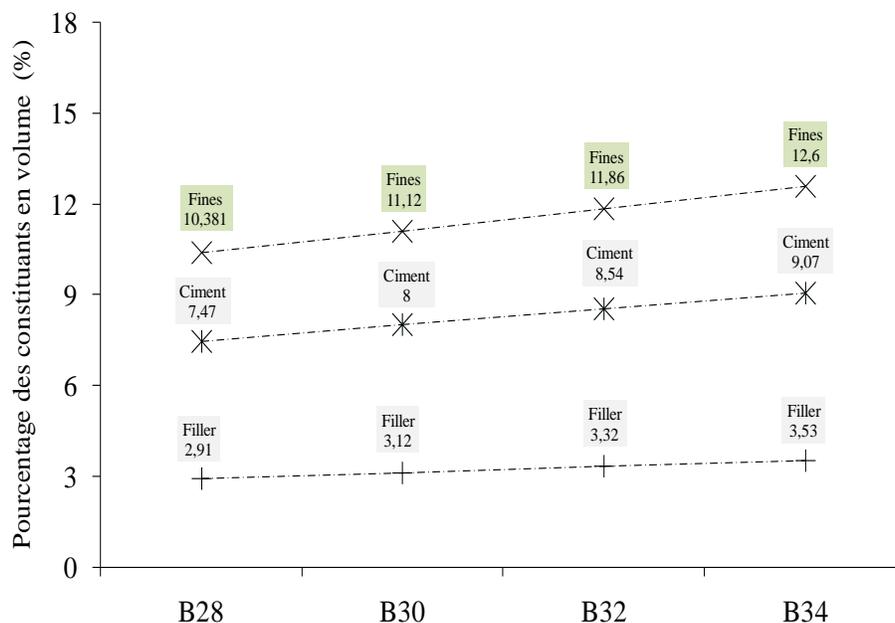


Figure II-7: Quantité de fines inférieures à 80 μm dans les bétons ordinaires.

L'augmentation du volume de pâte de 2 % dans un béton engendre un accroissement de 0.74% des grains inférieurs à 80 μm (fillers calcaires et ciment) et 1.6% d'eau. A titre d'exemple, le béton à 34% possède 2,2% de ces fines et 3.8% d'eau de plus que le béton à 28 % de pâte. Il est à noter que ces fines sont constituées pour le ciment de 80 % de grains inférieurs à 20 μm et pour le filler calcaire 63% sont inférieurs à cette dimension. Ces pourcentages mettent en avant l'augmentation significative des éléments inférieurs à 20 μm entre les différents bétons et leur demande en eau liée à l'effet d'adsorption des grains.

II.3.5.2 Bétons ordinaires adjuvés et BAP

La proportion des constituants dans les bétons ordinaires adjuvés et le BAP a été identifiée pour chaque dosage en superplastifiant. La Figure II-8 illustre le pourcentage en volume des constituants des bétons. La présence du superplastifiant contribue à une réduction de la quantité d'eau pour un maintien de l'ouvrabilité de ces bétons ordinaires. La conservation du volume de pâte entre un béton adjuvé ou non se fait avec une augmentation du pourcentage en volume de ciment et de filler calcaire (diminution du rapport E/L).

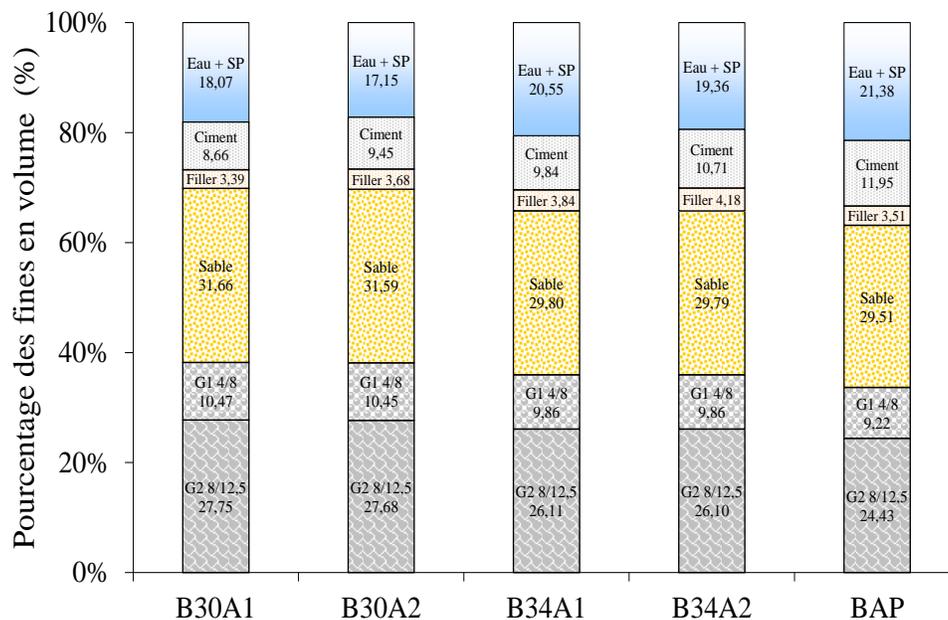


Figure II-8: Proportion des constituants pour les bétons adjuvés.

La Figure II-9 montre la proportion du ciment et du filler calcaire dans les bétons adjuvés.

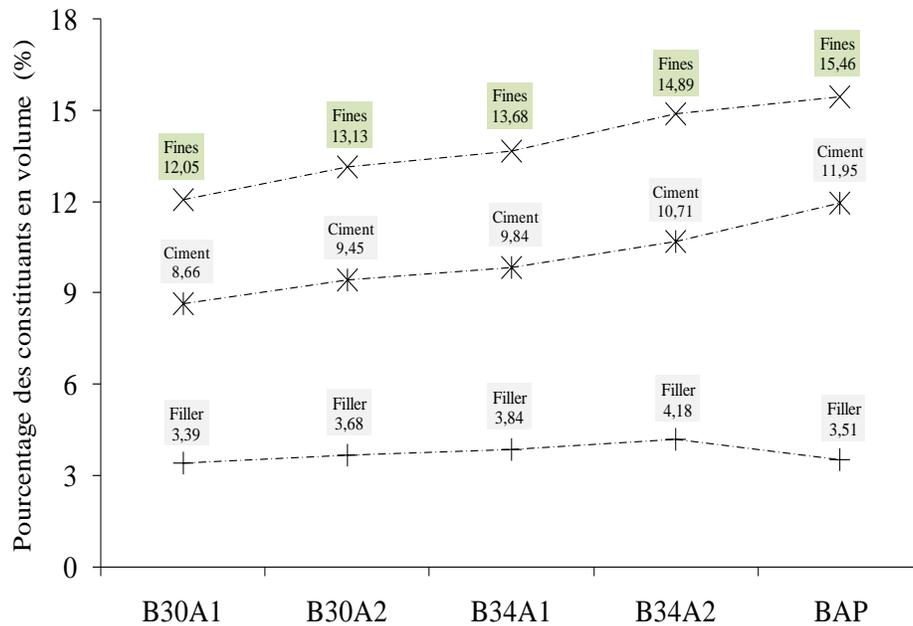


Figure II-9 : Quantité des fines dans les bétons adjuvantés.

Les bétons B30A1 et B30A2 possèdent le même volume de pâte et ils ont été formulés à base du béton ordinaire B30. Il en est de même pour les bétons B34A1 et B34A2. Pour les bétons à volume de pâte constant, la quantité des granulats a été gardée constante et le rapport E/L dépend du dosage en superplastifiant. Lorsque ce dernier augmente (A1 à A2), la quantité de fines augmente de 1.12 et 1.22% dans les bétons à 30 et 34% de pâte. Le béton autoplacant contient davantage de fines et moins de granulats.

II.4 Caractérisation des bétons frais

II.4.1 Ouvrabilité

Les termes comme ouvrabilité, maniabilité, consistance, plasticité, sont utilisés pour décrire l'aptitude du béton à l'écoulement. Cette caractéristique du béton frais est essentielle, elle conditionne la facilité de mise en place du béton dans le coffrage et influe sur le dosage en ciment et en eau dans le béton. La mesure de l'affaissement ou de l'étalement (BAP) permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à celle souhaitée.

II.4.1.1 Essai d'affaissement

Cet essai consiste à mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm). Le cône est rempli en 3 couches piquées chacune 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le moule est ensuite soulevé avec délicatesse et l'affaissement est aussitôt mesuré (NFP 18-451) (Figure II-10).

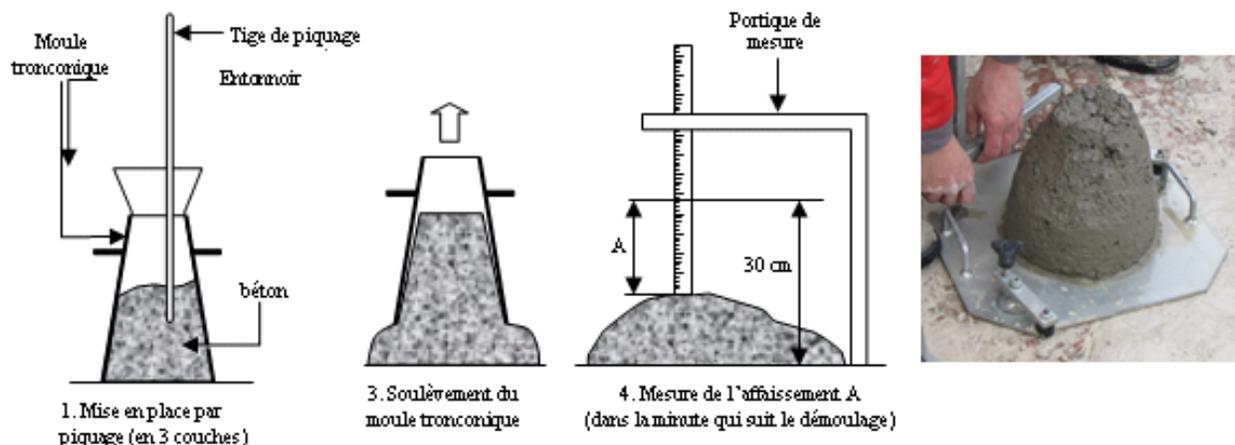


Figure II-10 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.

Les résultats obtenus montrent que les bétons ordinaires et les quatre bétons adjuvants sont de classe S3, très plastiques (Tableau II-3).

II.4.1.2 Essai d'étalement pour le BAP

La fluidité du béton autoplaçant (BAP) est caractérisée par un essai d'étalement au cône d'Abrams [52]. C'est une variante de l'essai d'affaissement qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires. La Figure II-11 montre une photo prise lors un essai d'étalement. Un étalement moyen de 650 ± 5 mm a été trouvé pour le béton autoplaçant (BAP). La valeur cible d'un étalement est généralement comprise entre 600 mm et 750 mm (recommandations AFGC).

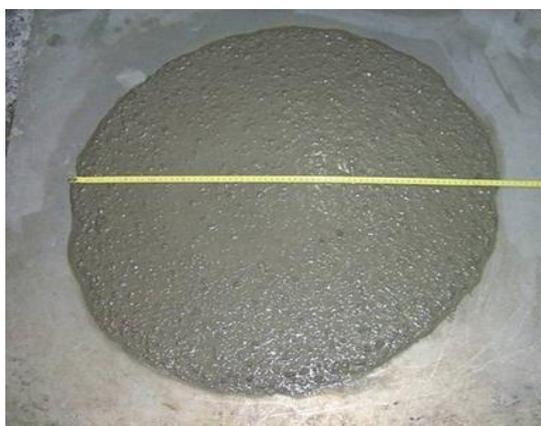


Figure II-11 : Essai d'étalement pour le BAP.

Les résultats obtenus pour tous les bétons sont donnés dans le Tableau II-3. La classe d'étalement du BAP, selon les recommandations AFGC, est désignée par SF1 (entre 550 et 650 mm). Aucun signe de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement n'a été observé.

Bétons	B28	B30	B32	B34	B30A1	B30A2	B34A1	B34A2	BAP
Affaissement (mm)	120	130	140	150	130	130	150	150	-
Étalement (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	650
Eau/ (ciment+filler)	0,57				0,5	0,43	0,5	0,43	0,45
Gravillons/Sable	1,27								

Tableau II-3 : Caractéristiques des bétons.

II.4.2 Essais complémentaires pour le BAP

II.4.2.1 Boite en L

La cohésion du béton et son aptitude à traverser une zone fortement armée est évaluée avec la boîte en forme de L (Figure II-12) [52]. Le principe de la méthode consiste à remplir une boîte contenant une zone d'armatures en mesurant la différence de hauteur dans la partie verticale se situant en amont des aciers (H1) et horizontales à l'extrémité en aval de la boîte (H2). Cette méthode permet de vérifier la ségrégation dynamique et les phénomènes de blocage (recommandation de l'AFGC).



Figure II-12 : Essai de la boîte en L.

Un taux de remplissage est déterminé à partir du rapport entre les distances H2 et H1. Un BAP doit posséder un taux de remplissage supérieur à 80 % pour un écoulement aisé en milieu confiné. Le béton testé présente un taux de remplissage de 91%. Cette valeur est largement acceptable pour sa mise en œuvre sur chantier.

II.4.2.2 Stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis est réalisé pour qualifier les bétons vis-à-vis du risque de ségrégation statique [52]. Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins d'un béton passant au travers d'un tamis de 5 mm d'ouverture (Figure II-13).



Figure II-13 : Essai de stabilité au tamis.

Cet essai consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis de 5 mm avec une hauteur de chute de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ afin de quantifier la laitance qui peut se désolidariser du béton. L'essai est réalisé après un repos de 15 minutes du béton. Un pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon est ainsi déterminé. Dans le cas des parties d'ouvrages exigües ou fortement ferrillées avec des longueurs de cheminement pouvant atteindre 10 m, ce qui représente les conditions les plus sévères de mise en œuvre pour les BAP, les recommandations de l'AFGC préconisent une valeur limite autorisée au tamis de 10 %. Au-delà de cette valeur, un risque important de ségrégation accompagnée d'un ressuage peut être observé. Dans le cas du BAP formulé dans cette étude, l'essai au tamis a montré que ce béton présente un pourcentage de laitance de 8%. Cette valeur répond au cas le plus préjudiciable pour la mise en œuvre du BAP.

II.4.3 Mesure de l'air occlus

Une teneur en air occlus élevée dans un béton frais réduit considérablement la résistance à la compression à l'état durci, il doit donc, toujours être mesuré et pris en compte lors de la confection du béton [53]. Dans cette étude, il est intéressant de mesurer l'air occlus dans le béton frais. Cette valeur donne une première indication sur la compacité du béton frais et sur la nature du contact béton/paroi lors du frottement.

Après le malaxage du béton, il est important de déterminer la teneur en air du béton frais. Cette valeur donne une première indication concernant la compacité du mélange [54]. La méthode est basée sur la compressibilité de l'air contenu dans le béton frais selon la norme NF P 18-353. Elle consiste à mettre une quantité de béton en communication avec un volume connu d'air en surpression. La valeur de la pression résultante permet de mesurer la teneur en air du

béton. Pour être certains que l'enceinte contenant le béton soit parfaitement remplie, on complète avec de l'eau après la mise en place du couvercle, sans oublier de piquer le béton en couches successives. La teneur en air du béton peut être lue directement sur le manomètre étalonné en fonction des caractéristiques de l'appareil (Figure II-14).



Figure II-14 : Aériomètre pour béton.

Le Tableau II-4 présente les résultats obtenus de la teneur en air occlus pour chaque béton.

Bétons	B28	B30	B32	B34	B30A1	B30A2	B34A1	B34A2	BAP
Teneur en air (%)	1,9	1,9	2	2	2,6	3,1	3,4	4	3,1

Tableau II-4 : Teneur en air occlus (%).

La quantité d'air occlus varie dans un béton ordinaire entre 1 et 2,5 %. La présence d'un superplastifiant peut entraîner une augmentation de ces valeurs en raison d'effets 'entraîneur d'air'. La quantité d'air occlus mesurée dans le cas de ces bétons varie entre 1,9 à 2 % pour les bétons ordinaires et 2,6 à 4 pour les bétons adjuvés. De plus, il est important de noter que cette variation d'air occlus est faible. Elle ne peut pas expliquer l'évolution des frottements à l'interface béton/paroi en fonction de la formulation des bétons.

II.4.4 Caractérisation rhéologique des bétons

II.4.4.1 Appareillage et protocole expérimental

Dans cette étude, le rhéomètre ICAR a été utilisé pour déterminer les paramètres rhéologiques des bétons frais. Cet appareil a été conçu à l'Université de Texas et est transportable sur chantier [55] [56]. Il est composé d'une cuve de 36 cm de diamètre et de 30 cm de hauteur (Figure II-15-a). La paroi de la cuve est rugueuse afin d'éviter tout glissement à la paroi. Le principe de la mesure est le suivant : deux lames de forme rectangulaires croisées à 90° forment un croisillon de hauteur de 13 cm. Cette pale ou vane est reliée à un capteur de couple est plongée dans la cuve contenant le mélange au repos.

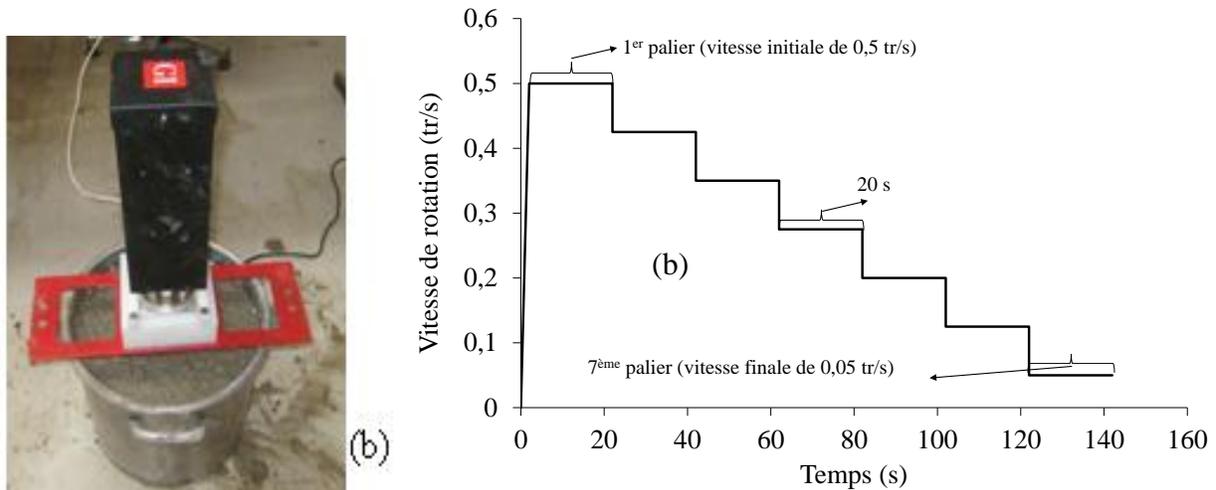


Figure II-15 : (a) Rhéomètre ICAR et (b) Protocole expérimental.

Le mélange est placé dans la cuve et l'essai débute par une phase de pré cisaillement, suivie d'un temps de repos afin que le béton puisse se restructurer complètement. Le béton est ensuite cisailé à une vitesse de 0,5 tr/s pendant 20 s afin d'obtenir une déstructuration complète du matériau. Puis, une diminution des vitesses de cisaillement par palier de 20 s est appliquée. Une moyenne de 10 points relevés à l'équilibre sur chaque palier de vitesse permet de déterminer la contrainte de cisaillement (Figure II-15-b). Un rhéogramme permet ensuite de déterminer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique à partir de l'évolution des contraintes de cisaillement en fonction du taux de cisaillement exprimés dans les unités fondamentales. Les courbes brutes sont quant à elles exprimées à partir du couple et de la vitesse de rotation. Le calcul du seuil de cisaillement (τ_0 en Pa) et de la viscosité plastique (μ en Pa.s) a été effectué à l'aide de l'équation de Reiner-Riwlin [47]. Les équations de passage sont données ci-après :

Le matériau est complètement cisailé

$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad \text{II-1}$$

Le matériau est partiellement cisailé

$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{2\pi h\tau_0}{T} \right) - \frac{\tau_0}{2\mu} \ln \left(\frac{T}{2\pi h\tau_0 R_1^2} \right) \quad \text{II-2}$$

$$\text{Avec : } R_2^2 = R_{2,eff} = \sqrt{\frac{T}{2\pi h\tau_0}}$$

Où :

Ω est la vitesse de rotation (rad/s), T est le couple (Nm), h est la hauteur de la vane (m), R_1^2 et R_2^2 représentent respectivement le rayon de la vane et le rayon de la cuve. $R_{2,eff}$ est le rayon efficace qui sépare la zone en écoulement et la zone morte à proximité de la paroi. Pour résoudre l'équation II-2, une optimisation non linéaire a été effectuée.

II.4.4.2 Bétons non adjuvés

Le volume de pâte est un facteur important sur la rhéologie du béton frais. Pour un squelette granulaire donné, le mélange de béton doit contenir un volume de pâte minimal pour que le béton soit maniable. Pour étudier l'influence du volume de pâte, les quatre bétons ordinaires ont été testés au rhéomètre. La Figure II-16 montre les résultats bruts obtenus à partir de l'expression du couple en fonction de la vitesse de rotation.

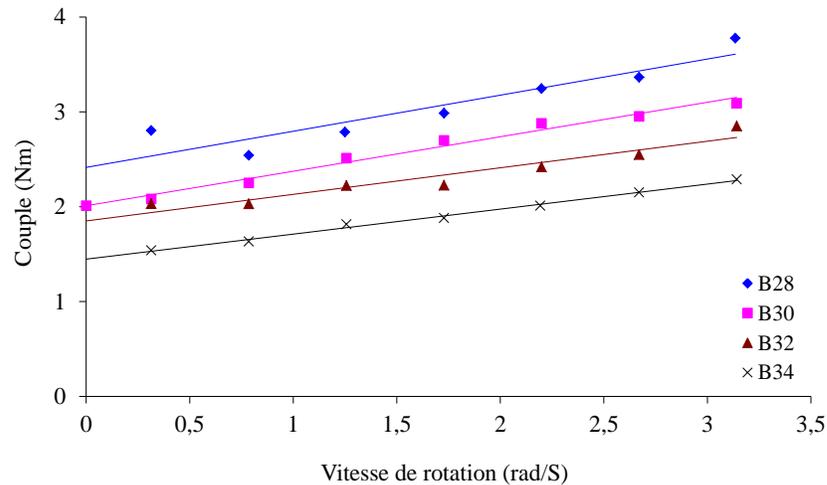


Figure II-16 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre- couple en fonction de la vitesse de rotation.

Le seuil de cisaillement (ordonnée à l'origine) et la viscosité plastique (pente) sont déduits des courbes d'écoulements. Les résultats expérimentaux recueillis sont résumés dans le Tableau II-5.

Bétons	B28	B30	B32	B34
Seuil de cisaillement (Pa)	549,1	502,3	429,9	355,4
Viscosité plastique (Pa.s)	30,1	25,3	21,1	16,7

Tableau II-5 : Seuil de cisaillement et viscosité plastique pour les bétons ordinaires.

Les Figure II-17 et II-18 illustrent l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique en fonction du volume de pâte. Les résultats montrent que l'augmentation du volume de pâte engendre une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. La pâte du béton confère à ce dernier une meilleure déformabilité.

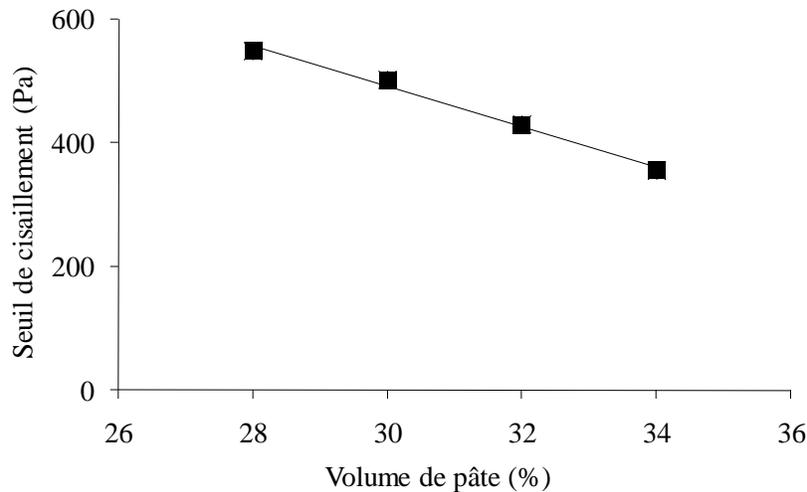


Figure II-17 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction du volume de pâte.

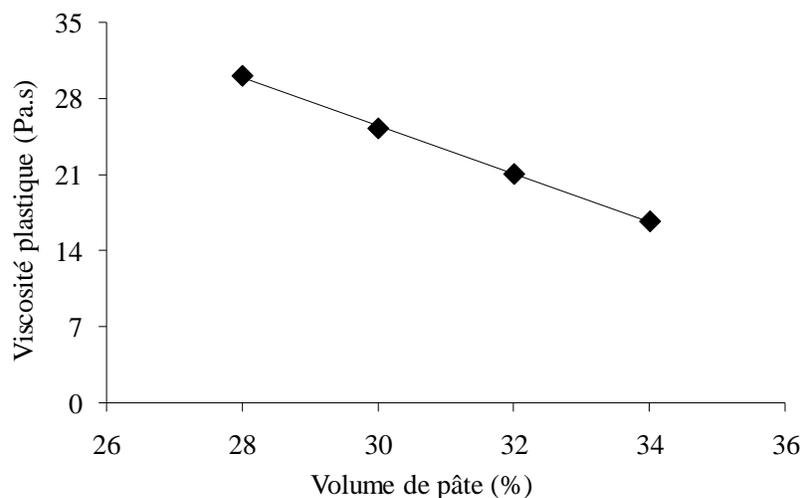


Figure II-18 : Evolution de la viscosité plastique en fonction du volume de pâte.

Le seuil de cisaillement dépend des frottements entre les grains composant le squelette granulaire du béton [54] [57] (Figure II-19). La contrainte de cisaillement du béton peut s'exprimer selon deux composantes : une contrainte liée à la dissipation visqueuse dans la pâte et une contrainte liée à la dissipation par friction entre les grains. Le modèle de Bingham, couramment utilisé pour la prédiction du comportement rhéologique des bétons ordinaires permet de relier les deux composantes précitées. Dans ce modèle, la contrainte de cisaillement est une fonction linéaire du gradient de vitesse. L'expression de ce modèle est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (\text{II-3})$$

Avec τ_0 la contrainte seuil de cisaillement, μ la viscosité plastique, τ la contrainte de cisaillement et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement.

Pour les bétons testés, le volume de pâte a été augmenté en gardant les rapports (E/L) et (G/S) constant dans les mélanges. Cette augmentation contribue à diminuer les frottements intergranulaires en lubrifiant les contacts granulat/granulat et par conséquent, une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique.

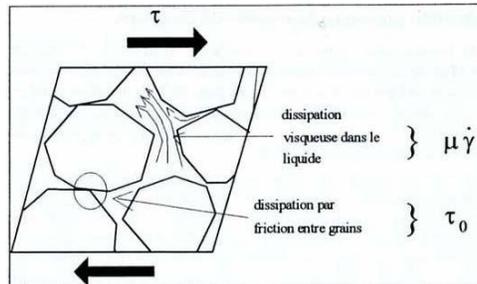


Figure II-19 : Interprétation physique du modèle de Bingham [57] [19].

II.4.4.3 Bétons adjuvés et BAP

L'introduction d'un superplastifiant dans un béton permet de défloculer les grains de ciment, ce qui améliore l'ouvrabilité. Dans la formulation des bétons, l'utilisation du superplastifiant peut réduire le dosage en eau, tout en gardant l'affaissement au cône d'Abrams constant [58]. La Figure II-20 montre les résultats bruts obtenus à partir de l'expression du couple en fonction de la vitesse de rotation.

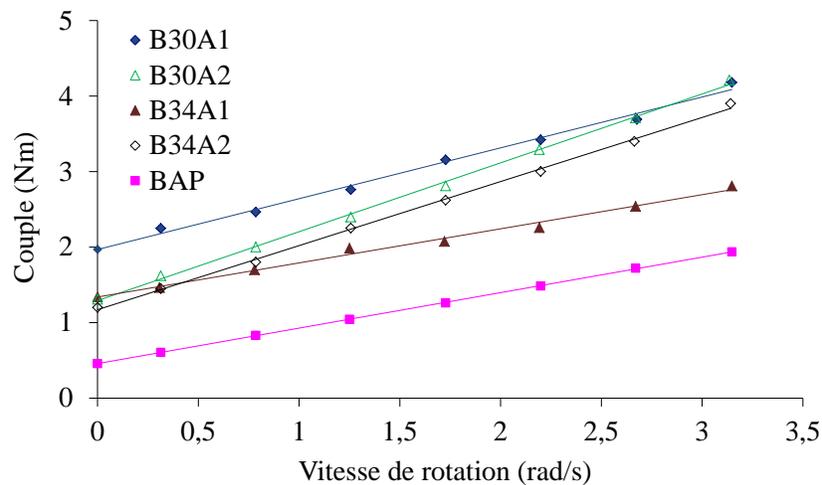


Figure II-20 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre - couple en fonction de la vitesse de rotation.

L'ajout du superplastifiant dans le béton est accompagné par une diminution du rapport E/L pour un maintien de l'ouvrabilité. La diminution de la quantité d'eau dans le mélange a un effet non négligeable sur l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique. Les propriétés rhéologiques des quatre bétons ordinaires adjuvés et le BAP sont résumés dans le Tableau II-6.

Bétons	B30A1	B30A2	B34A1	B34A2	BAP
Seuil de cisaillement (Pa)	410,5	239,6	283,3	202,4	74,9
Viscosité plastique (Pa.s)	62,4	109,8	41	90,3	57,1

Tableau II-6 : Seuil de cisaillement et viscosité plastique pour les bétons adjuvantés et le BAP.

La Figure II-21 présente l'évolution du seuil de cisaillement en fonction du dosage en superplastifiant pour les bétons B30, B34, B30A1, B30A2, B34A1 et B34A2.

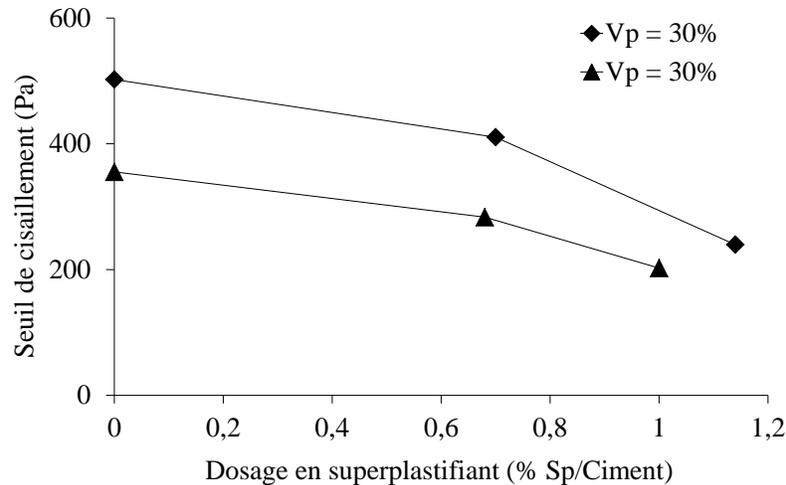


Figure II-21 : Evolution du seuil de cisaillement en fonction du dosage en superplastifiant.

Les résultats montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant et du volume de pâte provoque une diminution du seuil de cisaillement. Ce phénomène peut être expliqué par les propriétés du superplastifiant qui disperse les grains de ciment par l'effet stérique et répulsion électrostatique [59] (Figure II-22). Les molécules du superplastifiant s'adsorbent à la surface des particules du ciment leur conférant des charges électrostatiques négatives. De cette façon, les particules de ciment se repoussent pour se défloculer dans le mélange. Ce phénomène réduit les frottements intergranulaires en libérant la quantité d'eau emprisonnée ce qui améliore la fluidité du béton du point de vue de leur seuil d'écoulement.

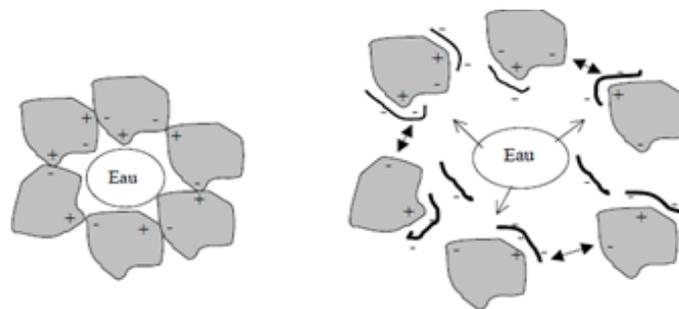


Figure II-22 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [60].

Quand le dosage en superplastifiant augmente, le frottement entre les grains diminue, et libère davantage de quantité d'eau emprisonnée. Avec l'augmentation du volume de pâte la quantité des grains de ciment dispersés dans le béton augmente. Les frottements intergranulaires sont davantage réduits. Ces phénomènes expliquent la diminution du seuil de cisaillement pour des teneurs en superplastifiant élevées.

La Figure II-23 présente l'évolution de la viscosité plastique en fonction du dosage en superplastifiant. Les résultats montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant est accompagnée d'une augmentation de la viscosité plastique du béton.

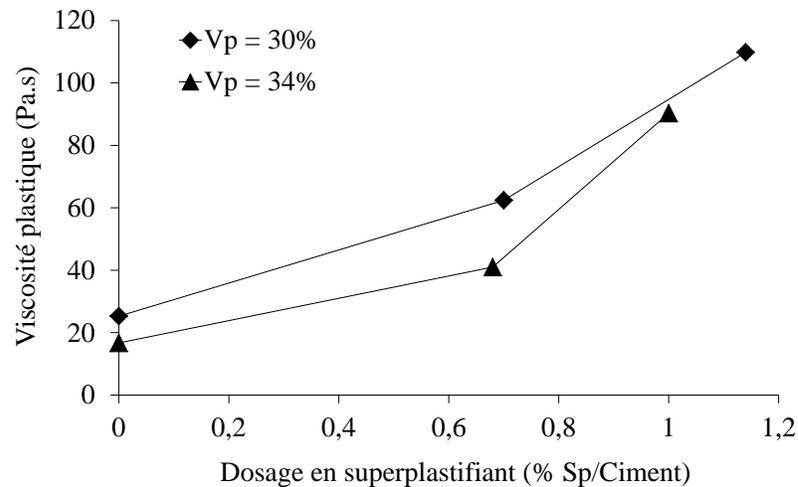


Figure II-23 : Evolution de la viscosité plastique en fonction du dosage en superplastifiant.

L'évolution de la viscosité plastique en fonction du pourcentage en superplastifiant peut être directement reliée à la diminution du rapport E/L. Cette diminution entraîne une augmentation de la concentration en solide dans le milieu. Ce phénomène favorise l'augmentation de la viscosité plastique du béton frais [61]. Dans certains cas, pour des dosages élevés en superplastifiant, une quantité importante de l'adjuvant reste en solution sans être adsorbée par les grains [47] [58]. Cette partie de superplastifiant contribue alors à l'augmentation de la viscosité plastique de la solution interstitielle, et ainsi à celle du béton.

II.5 Conclusion

Les essais de caractérisation des bétons ont permis de vérifier que la classe de consistance des bétons ordinaires adjuvantés ou non sont de classe S3 très plastique. Le béton autoplaçant (BAP) est de classe SF1 selon les recommandations de l'AFGC avec un étalement de 650 ± 5 mm. La caractérisation du BAP à l'aide des essais d'étalement, de la boîte en L et du tamis a permis de valider cette formulation. Elle ne présente pas de risque de ségrégation ou de ressuage et peut être mise en œuvre selon des conditions sévères (ferraillages denses, distance de cheminement élevée, endroits exigües) sur chantier.

L'étude rhéologique menée sur l'ensemble des bétons a montré que ces derniers se comportent comme un fluide de type binghamien. Ces bétons à seuil présentent une contrainte de cisaillement qui est une fonction linéaire du gradient de vitesse.

A partir des propriétés rhéologiques plusieurs observations ont pu être avancées. L'augmentation du volume de pâte permet de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Ce phénomène est dû au rôle lubrifiant joué par la pâte dans le mélange en limitant les frottements intergranulaires. De plus, l'ajout du superplastifiant en diminuant le rapport E/L pour le même affaissement, permet de réduire le seuil de cisaillement du béton. Quand le dosage en superplastifiant augmente, les frottements intergranulaires diminuent, ce qui explique la diminution du seuil de cisaillement. Pour conclure l'approche rhéologique, l'augmentation du dosage en superplastifiant augmente la viscosité plastique des mélanges.

Ce chapitre a également permis de présenter les classes granulaires des différents matériaux retenus pour cette étude. Dans le cas de ce matériau multiphasique, le ciment et le filler calcaire constituent les éléments les plus fins des mélanges. La taille des grains ne dépasse pas 80 μm et sont majoritairement inférieurs à 20 μm . Ces éléments fins ajoutés à l'eau et éventuellement le superplastifiant constituent la pâte des bétons. Le squelette granulaire est quant à lui défini comme étant constitué par les granulats (sable et gravillons). A l'approche d'une paroi, l'indice des vides local augmente en raison de l'espace laissé par les granulats. Ces vides ne peuvent être occupés que par des éléments fins. Ce phénomène est décrit dans la littérature comme l'effet de paroi. L'objectif du chapitre suivant est d'étudier le béton proche de la paroi dans une zone décrite comme étant une couche limite.

Chapitre III:

Etude de l'interface béton/paroi

III.1 Introduction

A l'interface béton/coffrage, nous ne sommes plus en présence de la pâte telle qu'elle a été définie à partir du volume de pâte des bétons mais d'une faible épaisseur composée de fines, d'eau et éventuellement de superplastifiant appelée « couche limite ». A partir des matériaux sélectionnés et présentés au chapitre II, ces fines définies comme étant les grains inférieurs à 80 μm sont essentiellement contenues dans le ciment et le filler calcaire.

Les caractéristiques et les propriétés physiques de cette couche sont particulières car sa composition diffère du reste du mélange [62]. Desouza et *al* [63] ont montré que la qualité finale d'un parement est liée directement au rapport E/C et à la teneur en particules fines dans le béton. Une augmentation du rapport E/C engendre un accroissement de la quantité d'eau à l'interface béton/coffrage.

Lors de la mise en place du béton dans le coffrage, plusieurs facteurs peuvent influencer la composition de cette couche : l'effet de paroi, la méthode de mise en place ou encore la formulation du béton. En partant du volume jusqu'à l'interface, le béton peut être décomposé schématiquement en trois zones [62] [63] (Figure III-1) :

- le béton avec ses propriétés de volume définies au chapitre précédent,
- une zone où les gravillons deviennent absents en raison de leur taille pour laisser place à un mélange correspondant à celui d'un mortier (diamètre maximal des grains inférieurs à 5 mm),
- une couche limite composée de ciment, d'eau, de fillers calcaires et éventuellement d'adjuvants selon la composition du béton à l'origine. Dans le cas présent, la dimension maximale des grains ne peut être que de 80 μm en raison des matériaux sélectionnés.

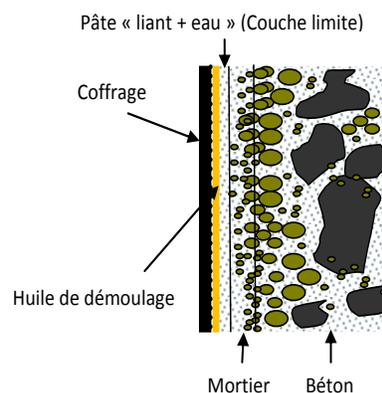


Figure III-1 : Représentation schématique de la formation d'une couche limite au voisinage du coffrage

Ce chapitre propose une étude de l'interface béton/paroi pour des bétons ordinaires sans adjuvant. L'effet du superplastifiant fera par contre l'objet d'une étude particulière au chapitre suivant au niveau des interactions possibles avec les huiles de démoulage. Le premier objectif de ce chapitre est d'observer sur des éprouvettes de béton durci la variation de la composition du béton à l'approche d'une paroi selon les conditions de chantier. L'effet de la pression de contact et du volume de pâte sur la densification du matériau à l'interface béton/coffrage a été étudié. Les pressions retenues correspondent à celles exercées par le béton frais sur une hauteur de coffrage comprise entre 1,2 et 3,6 m ce qui correspond respectivement à des pressions de 30 à 90 kPa. La composition et la quantité de pâte mobilisée à l'approche de la paroi ont été déterminées pour chaque pression de contact. En fonction des résultats obtenus, une étude de la couche d'interface à l'état frais sera présentée.

III.2 Etude du béton à l'état durci au voisinage de la paroi

Le but de cette étude est d'identifier les propriétés du béton au voisinage de la paroi du coffrage à l'état durci. Cette méthode est basée sur la détermination de la densité des bétons selon son épaisseur. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre plan/plan [10] [27] à des pressions de 0, 30, 50 et 90 kPa pour les quatre bétons ordinaires (B28, B30, B32 et B34). La vitesse de glissement de la plaque métallique est de 1,6 mm/s ce qui correspond à une vitesse moyenne de mise en œuvre du béton dans les coffrages de 6 m/h. Cette campagne expérimentale a été effectuée pour comprendre les phénomènes qui se produisent à l'interface béton/coffrage sous l'effet du frottement et de la pression de contact.

La procédure expérimentale consiste à conserver le béton jusqu'au durcissement sous pression dans le porte-échantillon après un essai de frottement. Le démoulage s'effectue 24 heures après la fin de l'essai. L'éprouvette de béton est ensuite découpée en 8 tronçons d'épaisseur $5 \text{ mm} \pm 0,2$ numérotés de 1 à 8 (Figure III-2). Les tronçons sont numérotés de N1 (surface en contact avec la plaque) à N8 (surface à 5 mm du fond mobile).

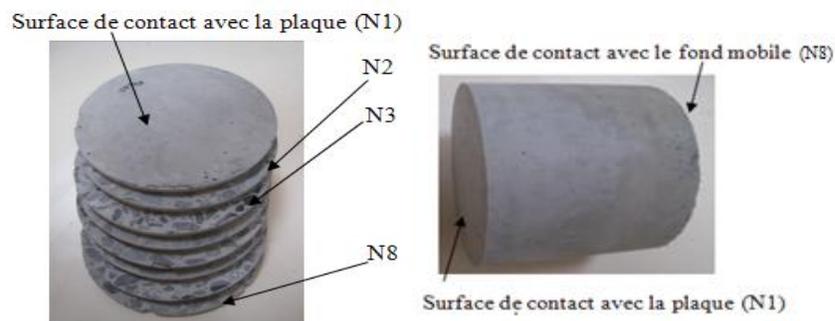


Figure III-2 : Découpe de l'échantillon en 8 tronçons cylindriques.

La Figure III-3 montre les découpes réalisées sur les éprouvettes de béton pour des pressions de 30 et 90 kPa. Des observations identiques ont été obtenues pour les pressions de 50 et 70 kPa.

La découpe N1 est représentée selon ses deux faces (recto : surface en contact avec la plaque ; verso : surface située à 5 mm de la plaque). Le béton en volume est présenté selon le cas N3. Le béton en volume est présenté selon le cas N3.

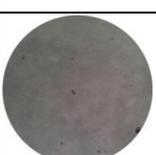
Bétons	P = 30 kPa			
	N1 recto	N1 verso	N3	N8
B28				
B30				
B32				
B34				
	P = 90 kPa			
	N1 recto	N1 verso	N3	N8
B28				
B30				
B32				
B34				

Figure III-3 : Photos des coupes pour une pression de contact de 30 et 90 kPa.

Le tronçon N8 a été sélectionné afin d'observer la composition du béton se trouvant à 5 mm à partir du fond mobile. La surface en contact avec le fond mobile (N8) à l'état durci ne présente pas de différence notable avec la surface en contact avec la plaque (N1).

Dans le cas du béton B28, plusieurs petites cavités peuvent être observées puis, avec l'augmentation du volume de pâte, celles-ci disparaissent pour laisser une surface plus homogène. Le B28 possédant moins de pâte, remplit plus difficilement l'espace entre la plaque et les éléments de tailles importantes. Ces cavités apparaissent quelles que soient les pressions pour le béton B28. Ces vides présents à l'interface résultent de la mise en œuvre du béton dans le porte-échantillon. Le protocole retenu pour la mise en œuvre est un piquage du béton (25 coups pour chacune des 2 couches) en raison de la configuration du tribomètre. Il est à noter également que la surface en contact avec la plaque métallique laisse apparaître une zone riche en éléments fins.

En s'éloignant de la paroi de 5 mm (tronçon N1 verso), le béton présente une surface homogène sans ségrégation apparente. Entre la surface du tronçon N1 verso, N3 et N8, aucune différence notable ne peut être avancée. Aussi des mesures de densité des différents tronçons sont entreprises afin d'évaluer d'éventuelles variations de la quantité de pâte ou de granulats dans le mélange.

III.2.1 Influence de la pression de contact sur la densité du béton

Les mesures de densité des différents tronçons ont été réalisées à partir de pesées hydrostatiques. L'échantillon est plongé dans un récipient rempli d'eau distillée attaché à une balance de 1/1000 g de précision. La Figure III-4 présente les résultats de mesure de la densité du matériau suivant la hauteur de l'échantillon pour chaque pression de contact. Un intérêt particulier est porté à l'interface béton/paroi. Chaque point représenté sur les graphiques correspond à une mesure de densité. Les mesures de densité effectuées sur les échantillons de béton avant le découpage montrent que la densité globale du béton est identique. Elle est de l'ordre de $2 \pm 0,06$, ce qui correspond à la densité du béton au cœur de l'échantillon.

A l'approche de la paroi, la densité augmente de manière significative en fonction de la pression exercée sur le béton. L'évolution de la densité sous l'effet de la pression entre le béton B28 et B30 reste faible. La valeur maximale de densité atteinte est aux alentours de 2,3 pour une pression de 90 kPa. Cette valeur maximale est identique pour les bétons B32 et B34.

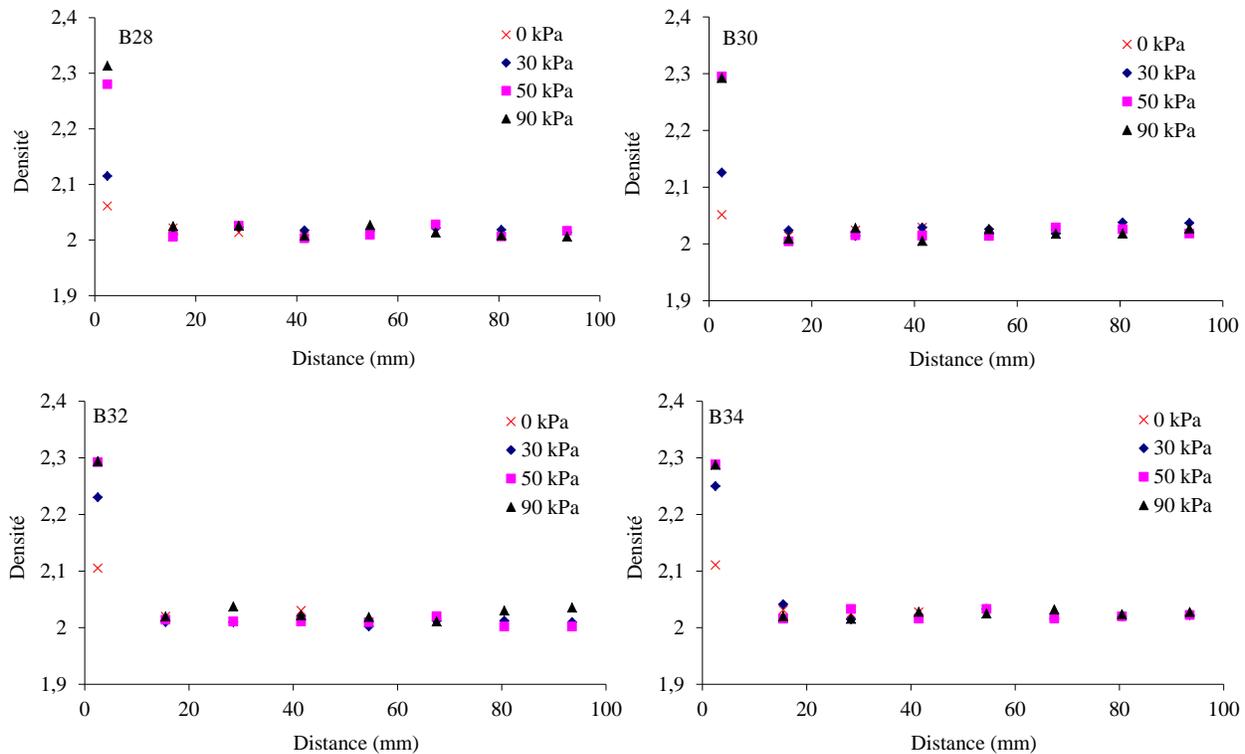


Figure III-4 : Densité du béton en fonction de la distance - effet de la pression de contact.

L'évolution la plus significative reste celle observée pour une pression de confinement de 30 kPa. Avec l'augmentation du volume de pâte entre le B30 et le B32, la densité passe de 2,13 à 2,23 respectivement. A cette pression, la composition du mélange à l'approche de la paroi dépend fortement du volume de pâte contenu dans le béton. De plus, il est possible de noter une augmentation de la densité sans pression de contact à partir du béton possédant 32% de pâte. La valeur atteinte est identique ensuite pour le béton B34. Ces phénomènes peuvent être directement reliés à l'effet de l'augmentation du volume de pâte dans le béton.

Ces résultats de mesure de densité confortent les observations visuelles effectuées sur les découpes en fonction de la pression de contact et le volume de pâte.

III.2.2 Influence du volume de pâte sur la densité du béton

La Figure III-5 présente la densité des quatre bétons en fonction de la hauteur de l'échantillon pour les différents échantillons découpés. Ces courbes permettent de mettre en évidence le rôle de la pâte sur l'évolution des densités pour chacune des pressions testées.

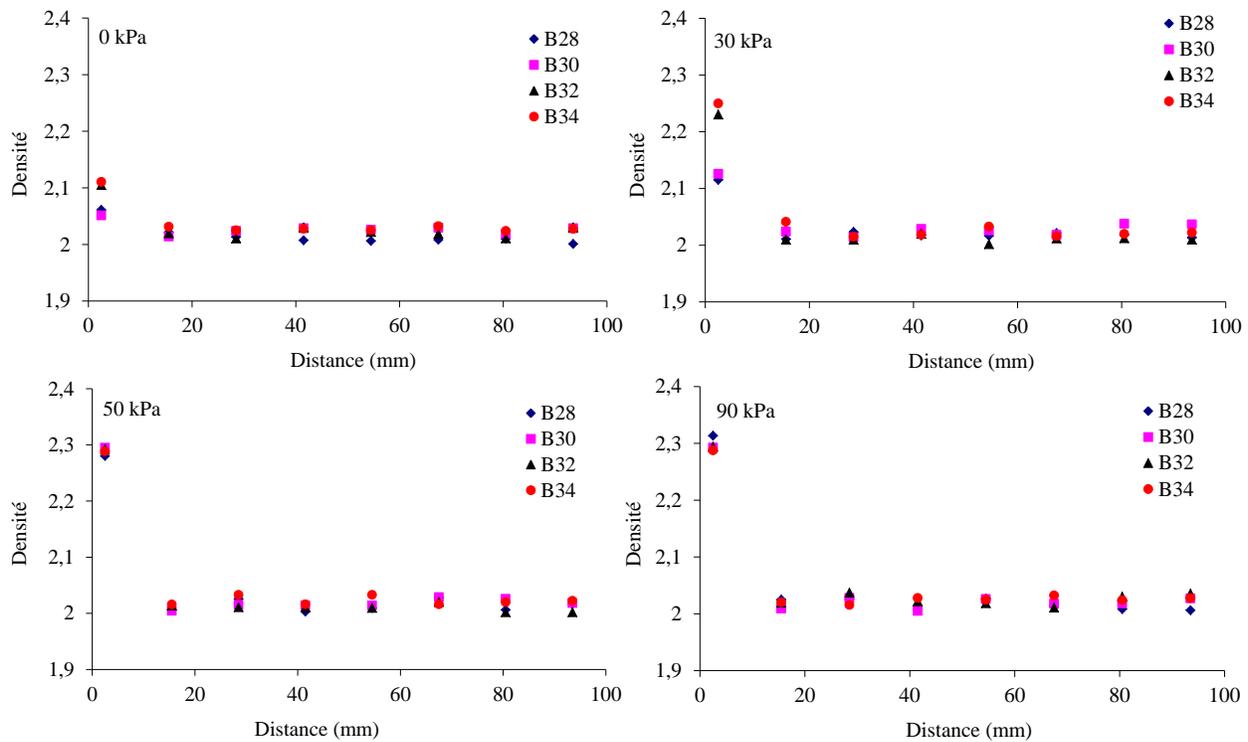


Figure III-5 : Densité du béton pour chaque tronçon -effet de la formulation du béton.

Pour des pressions inférieures ou égales à 30 kPa, les résultats obtenus montrent que le volume de pâte a un effet non négligeable sur la densité du matériau à proximité de la paroi. La différence la plus marquée est obtenue pour une pression de 30 kPa. Les bétons B28 et B30 possèdent les mêmes densités à l'approche de la paroi. Il en est de même pour les bétons B32 et B34 qui présentent des densités similaires entre eux. Il apparaît clairement, qu'à l'approche de la paroi, le béton tend à être plus riche en fines au-delà d'un volume de pâte de 30%. Cependant, pour des pressions supérieures à 30 kPa, les densités sont identiques quelle que soit la formulation du béton. La pression de contact modifie de manière importante les conditions d'interface. La densité augmente avec le volume de pâte pour les faibles pressions et est stable pour les pressions élevées. Ce phénomène peut être encore mieux apprécié à partir de la Figure III-6. Cette figure illustre la densité du béton à proximité de la paroi en fonction du volume de pâte pour chaque pression de contact.

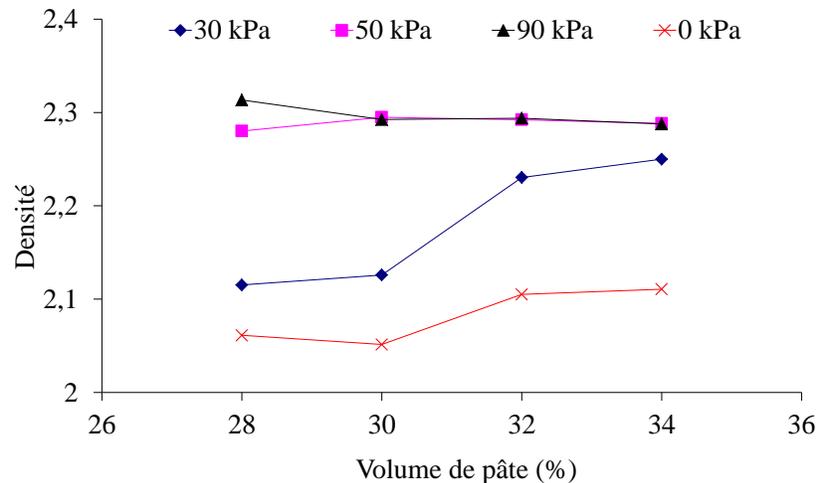


Figure III-6 : Densité de l'interface béton/coffrage.

L'évolution de la densité est significative pour des pressions inférieures à 30 kPa. Une augmentation importante des fines à l'interface est obtenue pour un volume de pâte compris entre 30 et 32 % et pour une pression de contact inférieure à 50 kPa (coffrage de hauteur inférieure à 2,10 m).

En conclusion, l'étude de l'évolution de la densité du béton sur des éprouvettes durcies en fonction de l'épaisseur de l'échantillon confirme que les propriétés et la composition de la couche de l'interface diffère du reste du béton. La densité dépend donc de la pression de contact et du volume de pâte. La détermination de la composition et des propriétés de cette couche d'interface est donc très importante pour la compréhension des phénomènes intervenant à l'interface béton/coffrage.

III.3 Etude de l'interface béton/paroi à l'état frais

Dans cette partie de l'étude, la composition du béton à l'approche de la paroi est déterminée pour les bétons ordinaires à différentes pressions de contact (0, 30, 50, et 90 kPa). Les proportions de chaque constituant sont évaluées afin de déterminer le rapport E/L à l'interface béton/coffrage.

La procédure expérimentale consiste à introduire le béton frais dans deux porte-échantillons de diamètre 120 mm et de profondeur 100 mm. Un fond mobile placé dans les porte-échantillons à l'arrière du béton permet de transmettre à celui-ci la pression délivrée par un vérin. Après un essai de frottement à une vitesse de glissement de 1,6 mm/s, les deux porte-échantillons sont retirés. La partie proche de la paroi est prélevée en plaçant le porte-échantillon verticalement sur une table et en poussant le fond mobile de 3 mm afin de pouvoir racler la pâte sortante à l'aide d'une raclette (Figure III-7). Le procédé d'extraction du matériau ne permet pas de descendre à des épaisseurs plus faibles. De plus, la présence de granulats de quelques millimètres de diamètre rend difficile l'extraction à 3 mm et empêche un prélèvement sur une épaisseur plus importante.

Le mélange ainsi récolté représente finalement une épaisseur inférieure et est constitué d'une pâte et de grains provenant du sable. L'opération est répétée deux à trois fois en fonction du béton testé afin de récupérer une quantité suffisante de matériau et de vérifier la répétabilité de l'essai.

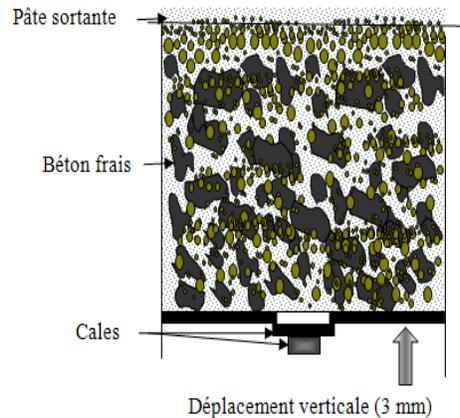


Figure III-7 : Schéma explicatif du prélèvement de la couche d'interface

L'analyse de la composition du matériau prélevée sera réalisée en cinq étapes :

- Détermination de la densité du matériau récupéré;
- Détermination de la teneur en eau ;
- Détermination de l'épaisseur moyenne du matériau récupéré ;
- Après le séchage de la pâte à l'étuve, la poudre résultante de ce séchage constituée de ciment, de filler calcaire et d'éléments provenant du sable a été récupérée pour une analyse granulométrique
- Détermination de la composition et du rapport E/L à l'interface béton/coffrage.

III.3.1.1 Mesure de la densité à l'état frais

La mesure de la densité du mélange recueilli, selon le mode d'extraction présenté précédemment, consiste à placer le matériau dans un récipient de volume connu. La pesée du mélange contenu dans le récipient permet ainsi de déterminer sa densité. Le Tableau III-1 présente la densité apparente du mélange recueilli à partir des quatre bétons à différentes pressions de contact.

Bétons	Densité			
	P = 0 kPa	P = 30 kPa	P = 50 kPa	P = 90 kPa
B28	2,01	2,028	1,92	2,09
B30	2,018	2,067	2,047	2,041
B32	2,037	2,103	2,11	2,052
B34	2,12	2,064	2,1	2,026

Tableau III-1 : Densité des milieux à l'interface des bétons testés.

Les résultats montrent que la densité apparente est comprise entre 1,92 et 2,12. L'amplitude de cette variation ne permet pas de se prononcer sur une quelconque tendance de la densité que ce soit sous l'effet de l'augmentation de la pâte ou de la pression de contact.

Ce phénomène est relié à la forte sensibilité de la mesure par pesée d'un tel milieu. Les différentes manipulations nécessaires à la détermination de la densité comme le remplissage du volume entraînent des sources d'erreur sur la mesure. De plus, les faibles quantités récoltées ne permettent pas par pesée d'obtenir des valeurs représentatives du milieu. L'effet du volume de pâte intervient davantage sur l'épaisseur de la couche limite.

III.3.1.2 Mesure de la teneur en eau

La connaissance de la quantité d'eau présente à l'interface béton/coffrage peut être un paramètre important dans l'explication des mécanismes qui se déroulent au voisinage de la paroi coffrante lors du frottement. Le volume d'eau mobilisé par le matériau proche de la paroi permet de définir sa fluidité. Cette opération a été effectuée sur chaque échantillon du matériau prélevé. Ce mélange récupéré est pesé dans une coupelle (préalablement tarée), puis est soumis à un processus de séchage. Le séchage a été effectué dans une étuve pendant 24h à une température de 105°C. La teneur en eau peut être calculée par la formule suivante

$$\omega = \frac{M_f - M_s}{M_s} \quad III-1$$

Avec :

ω : teneur en eau exprimée en %

M_f : masse de la pâte récupérée fraîche en g

M_s : masse de la pâte récupérée sèche en g

Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau III-2.

Bétons	Teneur en eau (%)			
	P = 0 kPa	P = 30 kPa	P = 50 kPa	P = 90 kPa
B28	20,1	21,6	22,7	24,1
B30	20,2	21,8	22,92	24,23
B32	19,92	20,3	22,79	23,81
B34	19,64	20,27	21,87	22,76

Tableau III-2 : Teneur en eau du mélange extrait à l'interface des bétons testés.

Une légère augmentation de la teneur en eau est observée lorsque le volume de pâte diminue et la pression de contact augmente. Dans le cas des bétons placés dans les porte-échantillons sans pression de confinement (P=0 kPa), l'interface se forme lors de la mise en œuvre du béton. Cette mise en œuvre est réalisée par piquage avec un protocole identique pour les quatre bétons (25

coups pour chacune des 2 couches). Ce mode de mise en œuvre permet d'augmenter la compacité du mélange dans le porte-échantillon. A l'approche de la paroi, les granulats de tailles élevées vont laisser place aux grains de dimensions plus petites pour combler les espaces dans le squelette granulaire. Cependant, des vides restent présents malgré la distribution granulaire étalée en tailles dans le mélange. Ces espaces peuvent être finalement remplis complètement ou partiellement par l'eau libre du béton. Avec l'augmentation du volume de pâte, la quantité de ciment et de filler, devenant plus importante, permet un meilleur remplissage des espaces entre les gravillons et le sable proche de la paroi. Par conséquent, moins d'espaces restent inoccupés et cette petite quantité d'eau libre est davantage répartie dans la totalité du mélange. Ces effets de mise en œuvre du béton ($P = 0$ kPa) peuvent expliquer la diminution de la teneur en eau du mélange extrait à l'interface.

L'évolution de la teneur en eau en fonction du volume de pâte reste dans les mêmes ordres de grandeur quelles que soit les pressions testées. Cependant, sous l'effet de cette pression de confinement, une faible quantité d'eau libre peut être dirigée vers de très petites cavités à l'interface qui sont difficiles à remplir par un simple piquage du béton. A partir du Tableau III-2, il est possible de noter que le béton B28 rencontre une augmentation de 4% de sa teneur en eau à l'interface entre 0 et 90 kPa. Dans cette même gamme de pression, le béton B34 a quant à lui une augmentation de 3 % environ de sa teneur en eau. Globalement, sous une pression de 90 kPa, le B34 présente 1,3% de teneur en eau en moins que le béton B28. La meilleure capacité de remplissage du béton B34 permet une réduction des petites cavités à l'interface difficile à remplir lors de la mise en œuvre du béton.

III.3.1.3 Epaisseur moyenne du mélange récupéré par extraction

Dans cette étude, l'épaisseur de la couche d'interface a été estimée par un simple calcul de volume du matériau à l'interface béton/coffrage. L'épaisseur de la couche d'interface (h) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$h = \frac{m}{\gamma \pi r^2} \quad \text{III-2}$$

Avec :

$$v = h \cdot \pi \cdot r^2 \quad \text{III-3}$$

m est la masse de l'échantillon, r est le rayon du porte-échantillon et γ est la densité de la couche d'interface.

La Figure III-8 présente l'épaisseur de la couche d'interface en fonction du volume de pâte pour différentes pressions de contact. Les résultats montrent que le volume de pâte est le facteur principal qui conditionne l'épaisseur de la couche d'interface. Quelles que soient les pressions exercées sur le béton, l'épaisseur augmente proportionnellement au volume de pâte du béton.

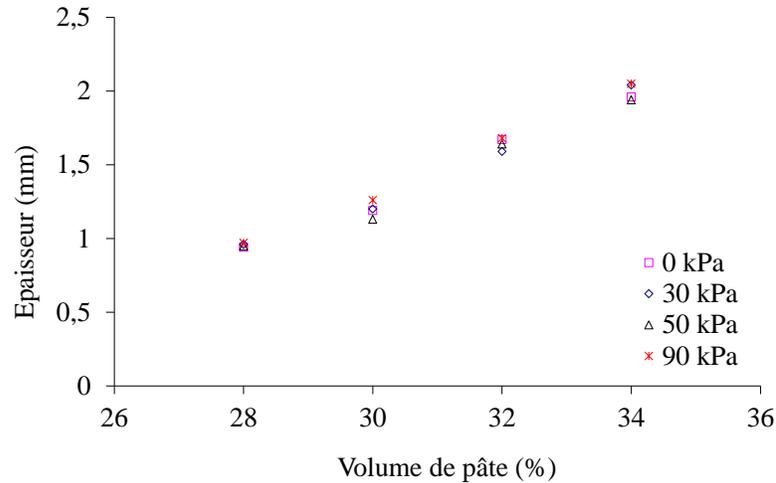


Figure III-8 : Évolution de l'épaisseur de la couche d'interface en fonction de volume de pâte pour les pressions de contact retenues.

L'épaisseur moyenne calculée à partir du volume extrait montre que les bétons présentent des granulats plus grossiers situés à 1 ou 2 mm derrière la paroi selon le pourcentage de pâte du béton. Ces granulats empêchent une extraction du matériau à l'interface sur 3 mm. Des grains viennent bloquer la raclette obligeant l'opérateur à le contourner entraînant ainsi une diminution de l'épaisseur extrait. Le phénomène est plus prononcé pour les bétons contenant moins de pâte. Ces résultats montrent que la couche limite composée de ciment de filler calcaire et d'eau possède une épaisseur très faible pour les bétons à faible teneur en pâte. Le Tableau III-3 récapitule les résultats obtenus sur les épaisseurs de la couche d'interface à l'interface béton/coffrage.

Bétons	Épaisseur (mm)			
	P = 0 kPa	P = 30 kPa	P = 50 kPa	P = 90 kPa
B28	0,94	0,96	0,95	0,97
B30	1,19	1,2	1,13	1,26
B32	1,67	1,59	1,64	1,68
B34	1,96	2,04	1,94	2,05

Tableau III-3 : Épaisseur de la couche d'interface pour les quatre bétons.

Globalement, lorsque la proportion des particules fines croît dans un béton, l'épaisseur de la couche d'interface augmente. Ces résultats montrent également que la pression de contact n'influence pas l'évolution de l'épaisseur de cette couche d'interface mais au regard de l'analyse de la teneur en eau, la composition de celle-ci peut en être affectée.

III.3.1.4 Analyse granulométrique

Après la détermination de la teneur en eau du mélange récolté, l'analyse granulométrique a été réalisée sur le matériau préalablement séché afin de déterminer les différents diamètres de

grains. Les pourcentages de tamisat cumulés et des refus partiels ont été présentés sous forme d'une courbe granulométrique qui traduit la distribution pondérale des grains. Les tamis retenus pour cette étude sont : 1,25 - 1 - 0,8 - 0,63 - 0,315 - 0,25 - 0,16 - 0,125 - 0,08 - 0,063 - 0,050 - 0,040 mm et un fond. Il est important de rappeler avant de commencer l'étude des courbes granulométrique que le ciment et le filler calcaire possède des tailles de grains inférieures à 80 μm selon l'étude menée au chapitre II. Les grains supérieurs à cette dimension proviennent exclusivement du sable. Le choix des tamis a donc été effectué en tenant compte de ces classes granulaires et de l'épaisseur moyenne définie précédemment.

Les Figure III-9 à III-10 représentent les courbes granulométriques des milieux extraits des bétons ordinaires testés pour les pressions retenues : tamisat cumulés et refus partiels. Les courbes exprimées en tamisat cumulé présentent une évolution assez similaire quel que soit le volume de pâte contenu dans le béton. Des résultats similaires ont été trouvés par Ngo [14]. Il a montré que le volume de pâte a peu d'influence sur la composition de la couche limite à l'interface.

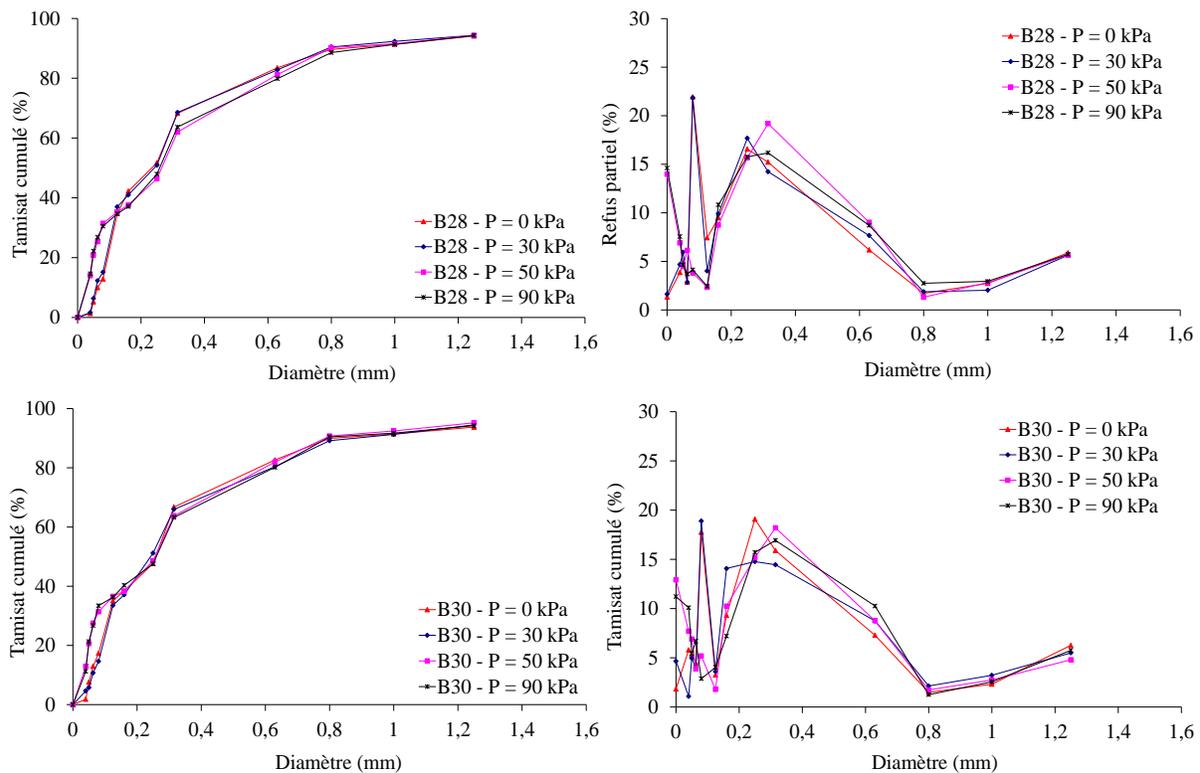


Figure III-9 : Courbe granulométrique du milieu extrait du B28 et B30; tamisats cumulés et refus partiels.

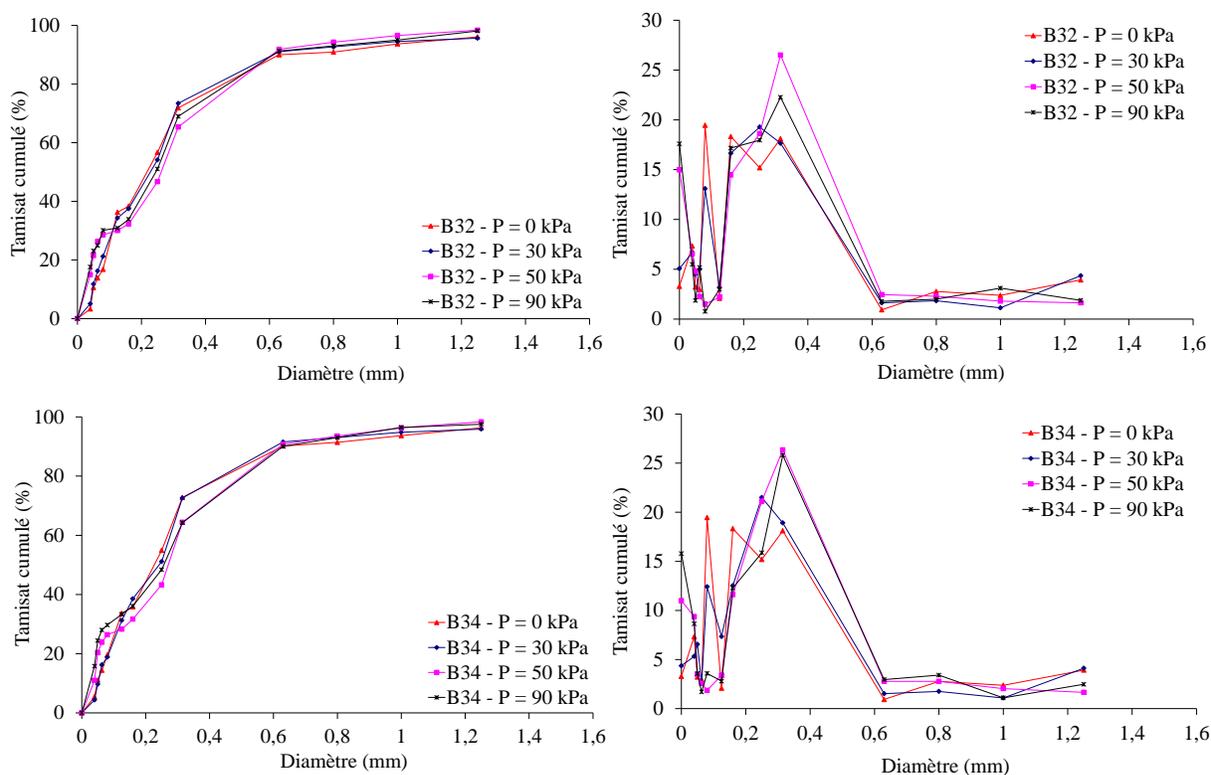


Figure III-10 : Courbe granulométrique du milieu extrait du B32 et B34; tamisats cumulés et refus partiels.

Il est possible de noter pour les quatre bétons qu'environ 70 % des grains ont une taille inférieure à 0,315 mm. Entre 70 et 90 % de tamisat cumulé, les bétons possédant plus de pâte présentent davantage d'éléments fins de diamètre 0,63 mm.

Les courbes de refus partiels font apparaître trois zones distinctes avec une évolution très sensible vis-à-vis de la pression de contact et du volume de pâte. Ces zones se situent au voisinage des tamis 40, 80 et 315 μm (Figure III-9 et III-10). Un léger enrichissement en grains de 40 μm est observé pour des pressions élevées (50 et 90 kPa). Cet enrichissement du béton à l'approche de la paroi concerne uniquement les particules inférieures provenant du ciment et du filler calcaire. Une diminution importante est également constatée pour les grains de 80 μm avec l'augmentation de la pression de contact. Le béton à l'approche de la paroi peut donc être influencé de manière importante par la pression de contact à l'interface béton/coffrage. Par ailleurs, à l'interface pour des volumes plus élevés de pâte, une augmentation des éléments inférieurs de 315 μm est observée.

En conclusion, il apparaît clairement que l'augmentation du volume de pâte dans les bétons engendre sous l'effet de la pression une augmentation des fines inférieures à 40 μm à l'interface. Ce phénomène peut avoir une influence sur l'évolution du frottement du béton contre la paroi.

III.3.1.5 Composition du mélange récupéré par extraction

La détermination de la proportion de la zone de béton prélevé à l'interface repose principalement sur l'analyse granulométrique du ciment, du filler calcaire et du sable. Afin de déterminer la composition de ce milieu, il est considéré que la quantité d'éléments fins du sable inférieurs à 80 μm est négligeable (Figure II-1). Le liant (ciment + filler) représente donc l'ensemble des grains inférieurs à 80 μm pour tous les bétons. Afin de déterminer la quantité de sable et la teneur en liant, le mélange a été placé dans un tamis de diamètre de 80 μm pour un tamisage sous l'eau. Ensuite, il est mis dans une étuve pendant 24 heures à 105°C. La teneur en sable est calculée par la formule suivante :

$$\%S = \frac{\text{Masse du sable sec}}{\text{Masse de la pâte fraîche}} \quad \text{III-4}$$

La teneur en liant se calcule comme suit :

$$\%L = \frac{\text{Masse de la pâte sèche} - \text{Masse du sable sec}}{\text{Masse de la pâte fraîche}} \quad \text{III-5}$$

Le pourcentage de l'eau est calculé à partir de la teneur en eau de la couche d'interface :

$$\%E = 100 - \%S - \%L \quad \text{III-6}$$

La Figure III-11 présente le pourcentage des constituants du mélange extrait des bétons pour les quatre pressions.

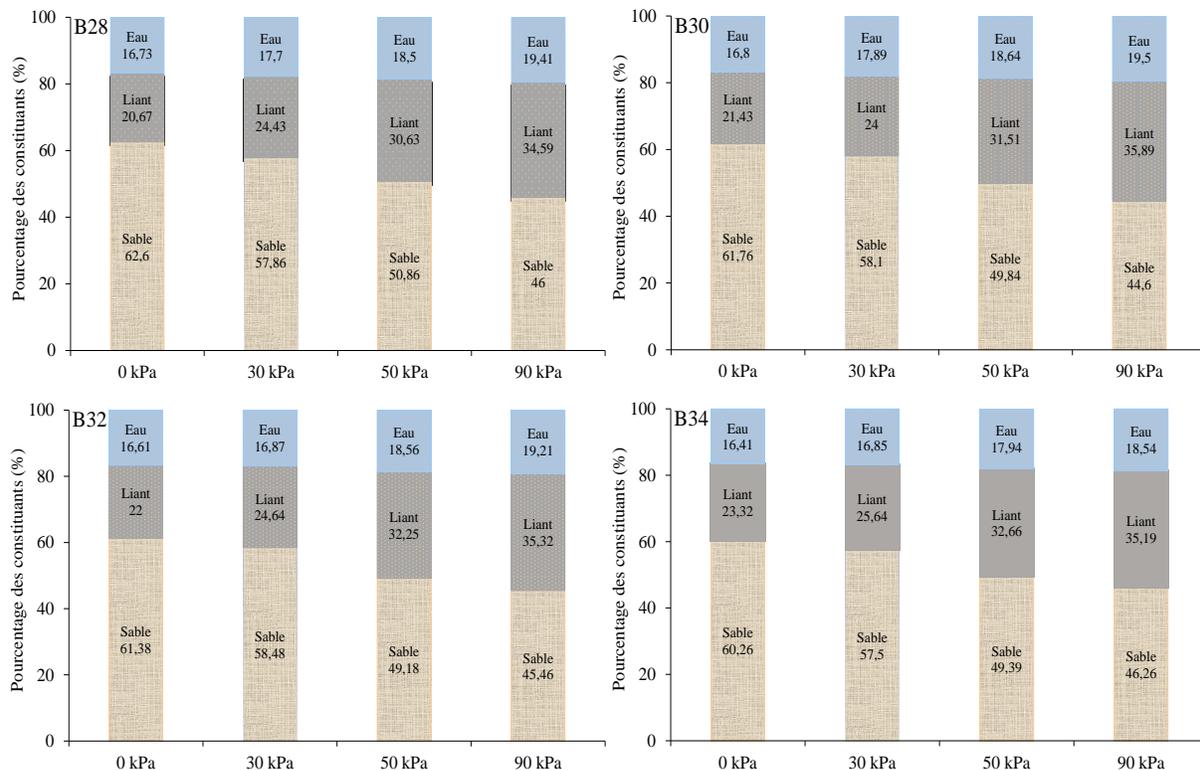


Figure III-11 : Proportion des constituants du mélange extrait pour les quatre bétons.

L'ensemble des valeurs exprimées en pourcentage massique est présenté dans le Tableau III-4.

Bétons	Constituants (%)	P = 0 kPa	P = 30 kPa	P = 50 kPa	P = 90 kPa
B28	Sable	62,6	57,86	50,86	46
	Liant (ciment + filler)	20,67	24,43	30,63	34,59
	Eau	16,73	17,7	18,5	19,41
B30	Sable	61,76	58,1	49,84	44,6
	Liant (ciment + filler)	21,43	24	31,51	35,89
	Eau	16,8	17,89	18,64	19,5
B32	Sable	61,38	58,48	49,18	45,46
	Liant (ciment + filler)	22	24,64	32,25	35,32
	Eau	16,61	16,87	18,56	19,21
B34	Sable	60,26	57,5	49,39	46,26
	Liant (ciment + filler)	23,32	25,64	32,66	35,19
	Eau	16,41	16,85	17,94	18,54

Tableau III-4 : Proportion des constituants du mélange extrait.

Les résultats montrent de nouveau que la pression de contact a une influence non négligeable sur la proportion des constituants. En effet, un accroissement du pourcentage des constituants est observé quand la pression de contact et le volume de pâte augmente. Des résultats identiques ont été trouvés par Kreijger [62]. Ces résultats montrent que cette couche de surface comporte environ 20 à 25 % de ciment. Dans le cas présent, cet ordre de grandeur est retrouvé pour les bétons non soumis à une pression. Lors de la mise en place du béton dans les porte-échantillons (P = 0 kPa), l'interface béton/coffrage devient plus riche en particules fines et en eau par rapport au reste du mélange par effet de paroi. Avec l'augmentation du volume de pâte cet effet s'accroît et permet de constituer une interface plus riche en fines sur une épaisseur plus importante. Le Tableau III-5 présente le pourcentage des constituants mobilisés pour la formation du milieu à l'interface béton/coffrage. Pour évaluer le pourcentage volumique de pâte, du sable et d'eau mobilisés pour former ce milieu, l'équation suivante a été utilisée :

$$\%C_M = 100 \times \left(\frac{e \times \%C_{cl}}{h \times \%C_b} \right) \quad \text{III-7)}$$

Où :

$\%C_M$: pourcentage des constituants en masse (ciment, filler calcaire, eau et sable) dans le béton mobilisé pour la formation du milieu à l'interface

e : épaisseur de la couche étudiée

$\%C_{cl}$: pourcentage des constituants en masse (ciment, filler calcaire, eau et sable)

h_b : hauteur de l'échantillon du béton

$\%C_b$: pourcentage des constituants en masse (ciment, filler calcaire, eau et sable) dans le béton.

Bétons	Constituants (%)	P = 0 kPa	P = 30 kPa	P = 50 kPa	P = 90 kPa
B28	Sable	0,181	0,170	0,148	0,137
	Liant (ciment + filler)	0,188	0,226	0,281	0,325
	Eau	0,090	0,097	0,100	0,107
B30	Sable	0,232	0,221	0,178	0,177
	Liant (ciment + filler)	0,230	0,260	0,321	0,406
	Eau	0,106	0,114	0,112	0,130
B32	Sable	0,332	0,302	0,261	0,248
	Liant (ciment + filler)	0,309	0,331	0,445	0,501
	Eau	0,138	0,134	0,151	0,161
B34	Sable	0,395	0,379	0,321	0,318
	Liant (ciment + filler)	0,363	0,416	0,504	0,573
	Eau	0,151	0,161	0,163	0,178

Tableau III-5: Pourcentage des constituants mobilisés pour la formation de l'interface béton/paroi.

Aussi, il est possible de représenter sous forme de diagramme le pourcentage massique des constituants nécessaire pour former ce milieu à l'interface (Figure III-12).

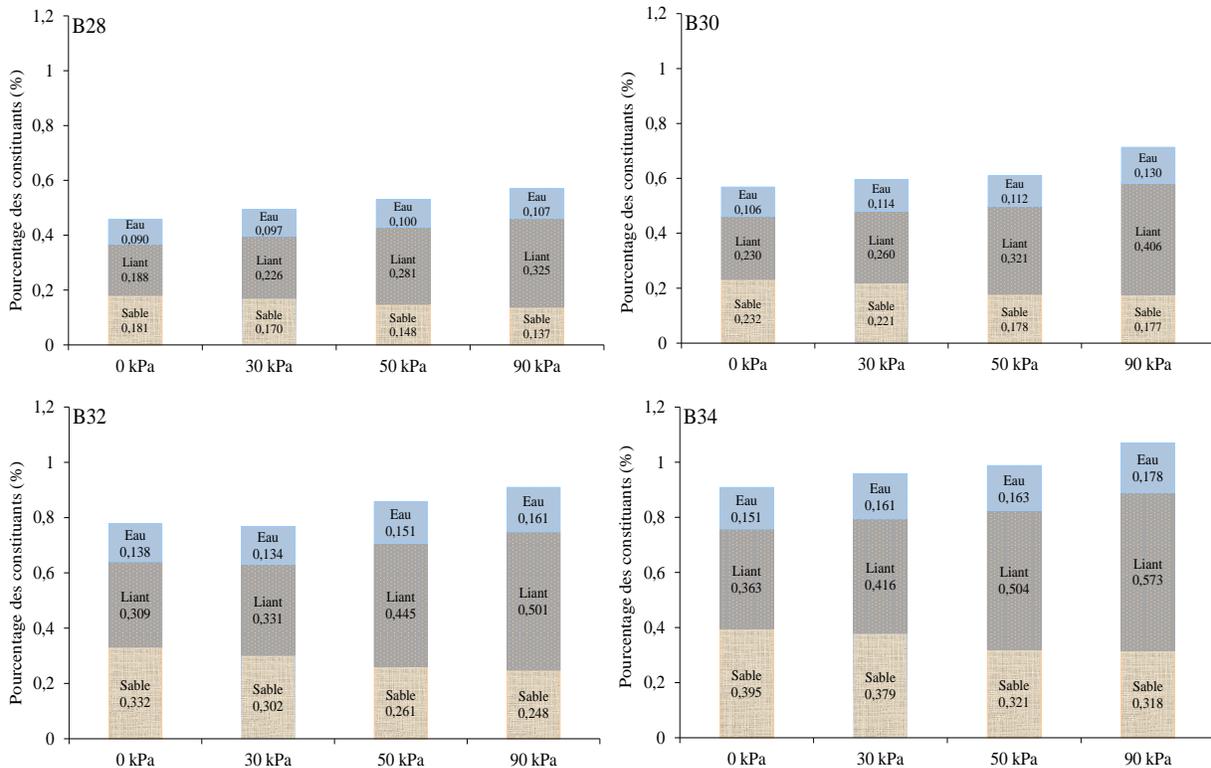


Figure III-12 : Proportion des constituants mobilisés pour la formation de la couche d'interface

Les résultats obtenus montrent que le pourcentage des constituants mobilisés pour former ce milieu à l'interface béton/coffrage dépend de la pression de contact et du volume de pâte. Les bétons à volume de pâte élevé mobilisent davantage de fines et de sable. De plus, une légère augmentation de la quantité d'eau mobilisée pour former la couche à l'interface est observée lorsque le volume de pâte et la pression de contact augmentent.

III.3.1.6 Rapport E/L du mélange prélevé

Afin de mieux comprendre l'effet de la pression de contact et la teneur en pâte dans un béton sur les propriétés de l'interface, la Figure III-13 représente l'évolution du rapport E/L en fonction de la pression de contact pour chaque béton. Les résultats montrent que le rapport E/L à l'interface béton/coffrage est plus important que celui du béton en son volume. Ces résultats confirment les observations de Crumbie [64]. Il apparaît donc que le volume de pâte et la pression de contact déterminent la fluidité de la couche à l'interface béton/coffrage.

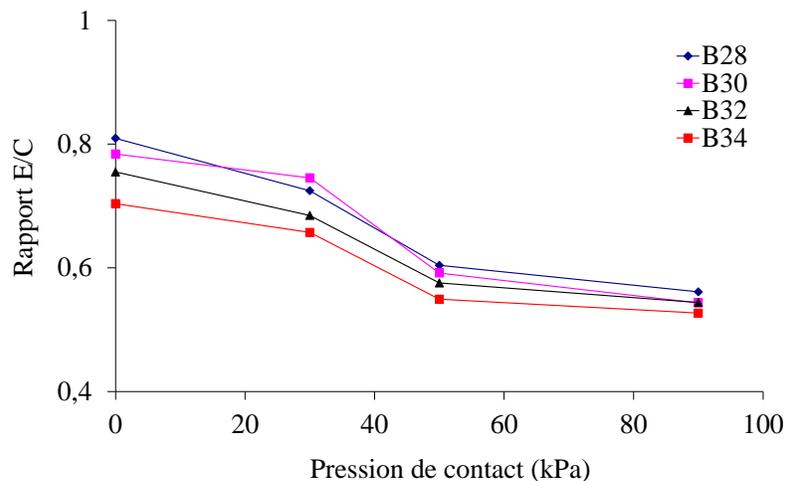


Figure III-13 : Variation du rapport E/L en fonction de la pression de contact pour les quatre bétons testés.

Le Tableau III-6 résume les résultats obtenus sur les épaisseurs de matériau à l'interface béton/coffrage.

Bétons	Rapport E/L			
	0 kPa	30 kPa	50 kPa	90 kPa
B28	0.809	0.725	0.604	0.561
B30	0.784	0.745	0.592	0.543
B32	0.755	0.685	0.576	0.544
B34	0.704	0.657	0.549	0.527

Tableau III-6 : récapitulatif des rapports (E/L)

Une diminution du rapport E/L est observée lorsque le volume de pâte est élevé. Cette diminution est plus prononcée pour des pressions inférieures à 90 kPa. Ce phénomène est

expliqué par la teneur élevée en pâte à l'interface qui bloque la migration de l'eau vers la plaque métallique. Pour une pression de contact de 90 kPa, le rapport E/L à l'interface est identique pour l'ensemble des bétons étudiés avec une valeur équivalente à celle du béton.

Ces résultats confirment l'influence des particules fines sur les contraintes de frottement à l'interface béton/paroi. Effectivement, l'augmentation du volume de pâte engendre un accroissement des éléments fins avec un rapport E/L faible à l'interface, ce qui favorise l'accrochage du béton sur la paroi coffrante (les particules fines s'incrudent dans les aspérités de la paroi), et donc, pourrait entraîner une augmentation du frottement à l'interface.

III.4 Conclusion

Cette étude concerne la composition de la couche présente à l'interface à l'état frais et durci. À l'état durci, la densification du béton peut se produire à l'interface béton/coffrage sous l'effet de la pression de contact.

Cette analyse de la couche d'interface a permis de définir l'influence de la pression de contact et le volume de pâte sur l'évolution des propriétés de la couche d'interface béton/coffrage. L'étude de la composition des bétons a montré que l'augmentation de volume de pâte et la pression de contact engendre un accroissement de la quantité des fines à l'interface, et par conséquent, une augmentation de l'épaisseur de la couche d'interface. Les résultats montrent également que la pression de contact n'influence pas l'évolution de l'épaisseur de cette couche d'interface. Le béton B34 offre une meilleure capacité de remplissage par la réduction des petites cavités à l'interface béton/coffrage.

Le pourcentage des constituants mobilisés pour former cette 'couche d'interface' à l'interface béton/coffrage augmente avec l'augmentation du volume de pâte et de la pression de contact. Cette augmentation est moins prononcée pour l'eau. L'analyse des résultats a montré que le rapport E/L à l'interface béton/paroi est plus important que celui du béton pour des pressions inférieures à 90 kPa. Il dépend du volume de pâte et de la pression de contact appliquée sur le matériau.

Ces phénomènes observés peuvent avoir une influence sur le frottement du béton contre la paroi coffrante.

Chapitre IV:

**Etude des interactions entre le superplastifiant,
la solution interstitielle et l'huile de démoulage**

IV.1 Introduction

Le choix d'un agent de démoulage qui appartient à la catégorie des lubrifiants, doit être adapté en fonction de la composition du béton, de la nature du coffrage et de la qualité de surface extérieure souhaitée. Outre ces critères techniques, le contexte actuel incite à prendre en compte des aspects d'ordre environnemental et sanitaire. A ce sujet, plusieurs éléments sont à considérer.

En effet, depuis Janvier 2008, l'article 44 de la loi d'orientation agricole du 6/01/2006 interdit l'utilisation d'huile minérale sur les sites déclarés sensibles (à proximité des cours d'eau, des forêts, des lacs et des zones de captage).

De plus, il faut savoir que seuls les lubrifiants répondant à l'écolabel européen sont exonérés de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP). On peut rajouter que les contraintes imposées par la réglementation REACH favorisent le développement des lubrifiants propres.

Les lubrifiants peuvent être concernés par la réglementation européenne [65] qui encadre les émissions de composés organiques volatils émis par les solvants. Toutes les formulations qui contiennent des solvants y sont soumises.

Certaines maladies professionnelles liées aux lubrifiants (maladies respiratoires ou cutanées) sont répertoriées par la Caisse Nationale d'Assurance Maladie (CNAM).

Dans ce contexte, des écolabels ont été développés pour harmoniser les critères techniques et environnementaux d'un certain nombre de produits, dont les lubrifiants, et pour garantir aux clients des propriétés adéquates. Les principaux critères pris en compte par l'écolabel européen (EEL) et l'écolabel français (marque NF-environnement) sont les suivants:

- la biodégradabilité en milieu aqueux
- l'écotoxicité aquatique
- la bioaccumulation dans le sol
- l'absence de phases de risque
- l'origine renouvelable des produits (taux minimum)
- les performances techniques

Dans ce contexte, on observe un engagement croissant des collectivités locales pour faire figurer des clauses environnementales dans leurs cahiers des charges. A titre d'exemple, on peut citer un document édité par la mairie de Paris pour les acteurs de la construction et de l'aménagement [66]. Ce document stipule l'utilisation des huiles de décoffrage biodégradables sur les chantiers de la mairie de Paris, pour limiter le déversement de substances toxiques ou nocives pour l'eau, la faune et la flore.

De plus, la consommation en huile de décoffrage et le choix de produits écolabelisés font partie des indicateurs retenus dans les cahiers techniques des chantiers à faibles nuisances [67]. Les huiles de décoffrage à base végétale sont donc amenées à jouer un rôle important pour répondre à ces attentes parce qu'elles sont en mesure de limiter les conséquences

environnementales et sanitaires. Ainsi, les prévisions font état d'un développement du marché des biolubrifiants dans les prochaines années.

C'est pourquoi, notre choix s'est porté sur l'étude simultanée, d'une huile minérale conventionnelle et d'une huile d'origine végétale. La nature chimique des huiles sur base végétale étant différente de celle des hydrocarbures qui composent les huiles minérales, on est en présence de nouvelles propriétés fonctionnelles et d'un mode d'action spécifique à ces produits, ce qui justifie notre étude comparative.

Sur un plan technique, la mise en œuvre du béton dans les coffrages s'accompagne de la formation d'un milieu interstitiel à l'interface correspondant à la zone de contact entre la solution interstitielle du béton et le film d'huile de démoulage [1] [6] (Figure IV-1).

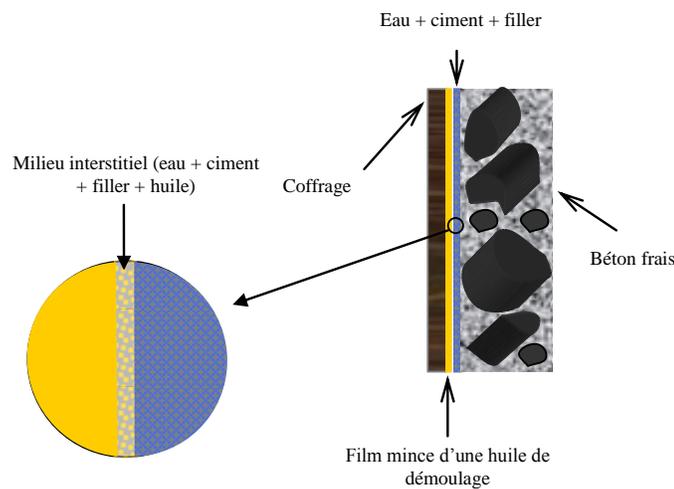


Figure IV-1 : Représentation schématique du milieu interstitiel.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la nature des interactions entre les différents composants de l'interface et de mieux comprendre les processus physico-chimiques au voisinage du coffrage, en fonction du dosage en superplastifiant. Cette étude est indispensable pour expliquer les phénomènes qui régissent le comportement tribologique du béton frais à l'interface béton/huile/coffrage lors du passage du béton sur les parois coffrantes.

Cette partie débute par la caractérisation des huiles de démoulage étudiées, ainsi que celle du superplastifiant. Dans un deuxième temps, la solution interstitielle collectée à l'interface béton/coffrage est utilisée pour reconstituer des milieux interstitiels formés à proximité du film d'huile résiduel. Les milieux interstitiels et les savons qui en résultent sont caractérisés par différentes méthodes adaptées.

Pour terminer, les différents résultats seront corrélés entre eux pour identifier les paramètres clés qui gouvernent l'efficacité des formulations au niveau de l'interface.

IV.2 Les huiles

Cette étude a été réalisée avec deux huiles commercialisées par la société CHRYSO, une huile minérale (Oleo50) et un ester végétal (Eco2) :

- CdemEco2 (Annexe 4) est un agent de démoulage différé prêt à l'emploi, d'origine végétale, sous forme d'un liquide jaune. Elle est élaborée sans solvant à partir de matières premières renouvelables. Elle est composée d'un ester végétal et d'un acidifiant. Les résultats attendus sont une surface décoffrée avec un aspect glacé, brillant et sans marbrure
- CdemOleo50 (Annexe 5) est un agent de démoulage différé prêt à l'emploi. Il s'agit d'une huile entière à base de paraffine, ayant l'aspect d'un liquide jaune. Elle assure le décoffrage de tous types de bétons, avec un aspect de parement amélioré. Ce produit contient des composants nocifs pour l'environnement (distillats paraffiniques légers, hydrotraités et des additifs tels que le dioléate de N-alkyl propylène diamine).

Les propriétés des huiles sont données dans le Tableau IV-1.

Nature de l'huile	Huile à base végétale	Huile à base minérale
Référence	Eco2	Oleo50
Couleur	Jaune	Jaune
Point éclair (°C)	> 100	> 100
Indice d'acide (mg KOH/g de produit)	5,4	1
Indice d'hydroxyde (mg KOH/g de produit)	1	0,85
Densité	0,93	0,86

Tableau IV-1 : Fiche technique des huiles.

L'huile minérale est composée d'une base primaire avec l'addition d'un acidifiant et d'un agent anti-corrosion qui ne sera pas pris en compte dans cette étude. La formulation d'origine végétale contient une teneur en acidifiant plus élevée. L'acidifiant est un acide gras issu de l'hydrolyse des huiles végétales. Les deux huiles ne comportent pas de tensioactif, elles sont destinées à une application directe.

IV.2.1 Mode d'application des huiles

Pour des raisons de rapidité et facilité de mise en œuvre, l'agent de démoulage est la plupart du temps appliqué comme une peinture, sous forme d'un film continu et uniforme, sans coulure avec un pulvérisateur et une buse adaptée en retirant l'excès de produit si nécessaire [68].

Les buses de pulvérisation se présentent généralement, sous la forme d'orifices calibrés au travers desquels doit passer l'huile, sous pression. À sa sortie dans l'atmosphère, le jet de l'huile

se décompose en gouttelettes qui relèvent du micron, qui, donnent lieu à une répartition plus ou moins uniforme.

En conditions statiques, la répartition des gouttelettes sur le coffrage peut varier selon le type de buse qui détermine le type de jet (buse conique ou plate), mais également la pression. La hauteur de la buse par rapport à sa cible a également une influence notoire sur la répartition [1] [68].

Pour réussir l'application de l'agent de démoulage, aussi bien en termes d'efficacité que de maîtrise de la dérive, le choix de la buse est plus important à prendre en compte. Sur les chantiers, il est recommandé d'utiliser des buses très fines en acier inoxydable, afin d'assurer une bonne répartition d'huile sur le coffrage [1] [68]. Il existe deux buses, couramment utilisées sur chantier :

- **Buse plate** : l'huile de démoulage sous pression est guidée axialement dans la chambre de la buse et traverse un orifice de forme elliptique (Figure IV-2-a). Ce genre de buse est conseillé pour les huiles entières avec un angle de 80° [68].
- **Buse conique** : La surface couverte est en forme de cercle plein avec une distribution uniforme des gouttelettes. En fonction du profil de l'orifice de sortie, l'angle de pulvérisation est plus ou moins large (Figure IV-2-b). Ce type de buse est mieux adapté à la pulvérisation des émulsions avec un angle compris entre 60° et 80° [68].

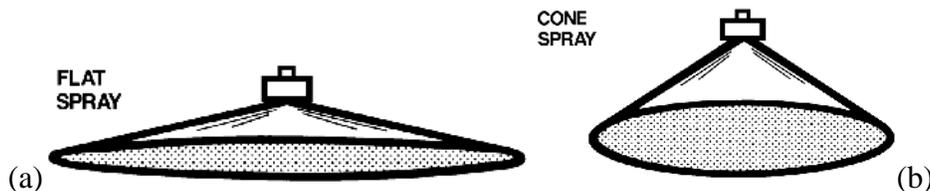


Figure IV-2 : (a) Buse plate et (b) Buse conique.

A noter que les agents de démoulage à base végétale peuvent être appliqués avec tous les types de pulvérisateurs. Le choix de la buse est sélectionné suivant la viscosité du produit. La distance de pulvérisation est d'environ de 20 cm [1]. Pour cette étude, un pulvérisateur de type Ecospray à buse conique a été utilisé (Annexe 6). C'est un micro diffuseur à réserve de pression qui pulvérise sur mesure les huiles de démoulage (Figure IV-3). Un film d'huile végétale très mince, environ de 1 à 2 μm d'épaisseur suffit pour décoffrer et obtenir un parement de qualité [1] [69].



Figure IV-3 : Pulvérisateur – Ecospray

IV.2.2 Propriétés rhéologiques des huiles

Les propriétés rhéologiques des huiles de démoulage jouent un rôle primordial à l'interface béton/huile/coffrage. Elles influencent directement la mouillabilité, les contraintes de frottement à l'interface béton/coffrage et la qualité finale du parement [1] [6].

La viscosité des deux huiles est déterminée à l'aide d'un viscosimètre HAAK VT550 à vitesse imposée, équipé d'un corps de mesure SV DIN. Ce dispositif de mesure est à cylindres coaxiaux dont les caractéristiques géométriques sont données à la Figure IV-4. Le volume d'huile introduit dans le godet de mesure est constant (14 ml). Les mesures de la viscosité ont été réalisées à température constante (20 °C).

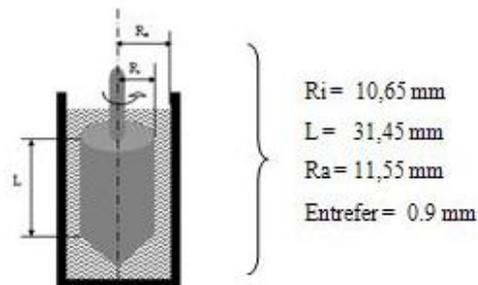


Figure IV-4 : Géométrie SV DIN

La Figure IV-5 présente la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse. Les résultats montrent que ces deux huiles ont un comportement linéaire sans seuil d'écoulement. Le comportement des huiles est donc newtonien. L'expression de la loi de comportement est donnée ci-dessous :

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{IV-1}$$

η est la viscosité dynamique (Pa.s), τ est la contrainte de cisaillement (Pa) et $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse (s^{-1}).

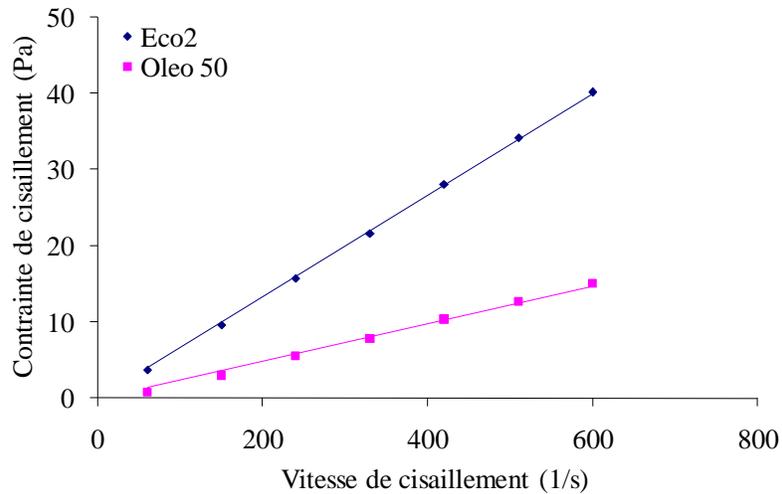


Figure IV-5 : Contraintes de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.

La viscosité des deux huiles sont données dans le Tableau IV-2 :

Nature de l'huile	Viscosité (mPa.s)
Huile végétale (Eco2)	66,6
Huile minérale (Oleo50)	24,5

Tableau IV-2 : Viscosité dynamique des huiles.

IV.2.3 Mesure de la tension superficielle liquide/vapeur

IV.2.3.1 Méthode expérimentale

La mesure de la tension de surface a été effectuée au sein du laboratoire de Chimie Agro Industrielle (LCA-CATAR) par la méthode de la lame de Wilhelmy à 20°C. L'appareil utilisé est un tensiomètre 3S de la société GBX muni d'une lame en platine. Dans cette méthode, une fine plaque de platine est accrochée à une balance de Kaloï puis immergée dans un liquide contenu dans un réservoir. La tension de surface se manifeste par le ménisque qui se forme le long de son périmètre (Figure IV-6).

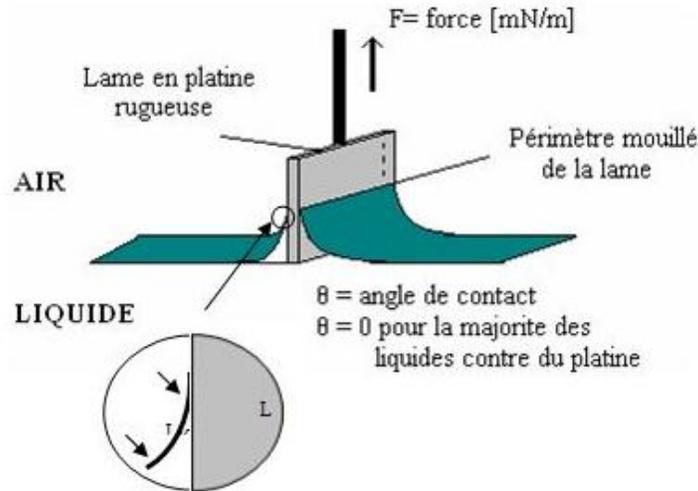


Figure IV-6 : Principe de mouillage de la lame [70].

La résultante des forces verticales montre que le poids, w , du ménisque supporté par la lame est égal à la force fournie par la surface. Cette force est égale à la composante verticale de la tension de surface, $\gamma \cos \theta$, où θ est l'angle de contact avec la lame, multipliée par le périmètre de la lame L_b .

$$\gamma = \frac{P_w}{L_b \times \cos \theta} \quad \text{IV-2}$$

Cette méthode attribuée à Wilhelmy en 1863 ne nécessite aucune correction et son utilisation est simple notamment dans le cas où l'angle de contact est nul.

L'huile à étudier est mise dans un cristalliseur en verre préalablement nettoyé. La lame est placée à environ 5 mm de la surface d'huile. La mesure débute lorsque la surface du liquide entre en contact avec la lame maintenue en position verticale. La tension de surface se traduit par une force s'exerçant sur la lame et mesurée par un capteur de pesée.

Après la mise en contact de bord inférieur de la lame avec le liquide échantillon, la lame est happée par le liquide. La force Wilhelmy résultante de ce mouillage est mesurée lorsque la lame est sortie du liquide (Figure IV-7).

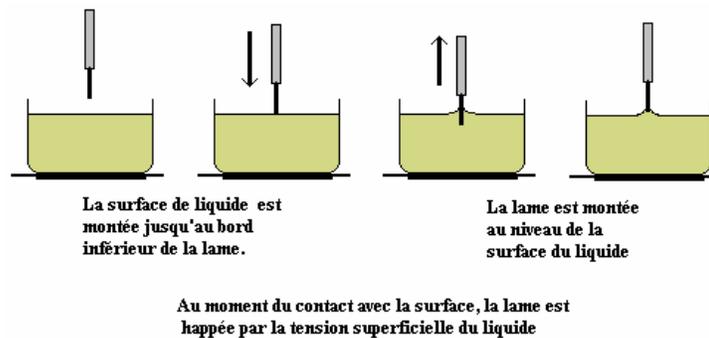


Figure IV-7 : Etapes de la mesure de la tension superficielle par la méthode de la lame [71].

IV.2.3.2 Résultats

Les résultats obtenus sur la tension superficielle des deux huiles : huile minérale à base paraffinique (Oleo50) et l'huile formulée avec un ester d'origine végétale (Eco2) sont données dans le Tableau IV-3.

Huile	Eco2	Oleo50
γ_{lv} à 21°C (mN/m)	33,4	30,63

Tableau IV-3 :Tension de surface des deux huiles.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la tension de surface de l'huile végétale CdemEco2 sont proches des valeurs de l'huile d'origine minérale. Des résultats similaires ont été trouvés par Libessart [1] (33,8 mN/m pour l'huile végétale (Eco2) et 31,6 mN/m pour (CHF)). Il est important de signaler que le mouillage du support par un liquide se produit lorsque $\gamma_{sl} > \gamma_{lv}$. L'énergie de surface libre de la plaque métallique neuve est de 46,6 mN/m [1].

IV.3 Caractéristique du superplastifiant

Le GLENIUM 27 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther d'acide polycarboxylique modifié. Son pH est de 7 ± 1 (Annexe 1). Le pouvoir tensioactif est une propriété importante qui caractérise un superplastifiant. Nous avons cherché à évaluer cette propriété en déterminant expérimentalement la concentration micellaire critique (CMC) par la mesure de tensions superficielles.

Pour une concentration inférieure à la CMC, le tensioactif forme une couche en surface du liquide et l'excès est dispersé dans la solution. Au-delà de la CMC, le tensioactif ajouté forme des micelles sphériques [72]. Les molécules en solution sont alors en équilibre avec les molécules adsorbées à la surface. La CMC est donc la concentration en tensioactif pour laquelle un nombre constant de molécules de surfactant sont sous forme agrégée, selon Yoshikiyo [73].

Les solutions ont été préparées avec des concentrations en superplastifiant comprises entre 0 et 2 g par litre d'eau. Les solutions sont laissées au repos 24 heures avant la mesure des tensions superficielles. La méthode de lame de Wilhelmy a été utilisée pour mesurer les tensions superficielles (Tensiomètre GB 3S) en fonction de la concentration en superplastifiant.

La courbe résultante (Figure IV-8) indique une concentration micellaire (CMC) de l'ordre de 1.54 g de superplastifiant par litre d'eau à 25 °C. Les tensioactifs commerciaux ont généralement une CMC comprise entre 1 et 10 mg/L.

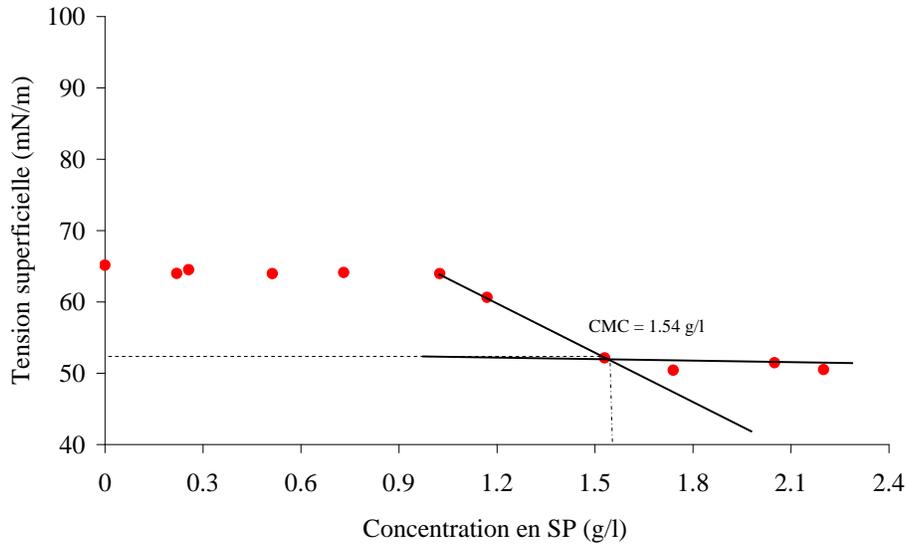


Figure IV-8 : Concentration micellaire critique du superplastifiant dans l'eau à 25°C.

Cette mesure confirme qu'il faudra prendre en compte le rôle du superplastifiant en tant qu'agent de surface dans l'organisation du milieu interfacial. Nous avons déterminé la concentration du superplastifiant dans l'eau de gâchage en (g/l) à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Concentration en SP} = \frac{\text{Masse du SP dans le béton}}{\text{Volume d'eau de gâchage}} \quad \text{IV-3}$$

Les valeurs du Tableau IV-4 montrent que la concentration du superplastifiant dans l'eau de gâchage des bétons adjuvantés est supérieure à la CMC et donc permet de générer des micelles à l'interface béton/huile/coffrage.

Béton	Dosage en superplastifiant (% de ciment)	Concentration du superplastifiant dans l'eau du gâchage (g/l)
B30A1	0,7	10,51
B30A2	0,68	19,83
B34A1	1,14	10,35
B34A2	1	19,43
BAP	1,64	29,21

Tableau IV-4 : Concentration du superplastifiant dans l'eau du gâchage des bétons.

Pour préciser le rôle du superplastifiant dans l'organisation du milieu à l'interface béton/huile/coffrage, il est nécessaire de reconstituer ces milieux à partir d'une solution interstitielle issue des bétons frais.

IV.4 Définition de l'interface béton/huile/coffrage

Nous sommes en présence d'une interface complexe béton/huile/coffrage que l'on peut décomposer en cinq milieux différents qui interagissent entre eux (Figure IV-9) :

- la paroi coffrante,
- le film d'huile composé d'hydrocarbures (huile minérale) ou d'esters (huile à base végétale),
- un film de savon qui s'est déposé sur le film d'huile,
- une zone émulsionnée, résultant de l'émulsion entre la solution interstitielle et le film d'huile, et plus ou moins stabilisée par le savon et le superplastifiant,
- la solution interstitielle de béton qui contient l'adjuvant (SP) et des ions Ca^{2+} , OH^- (basique). Ses propriétés dépendent de la formulation du béton (avec ou sans superplastifiant).

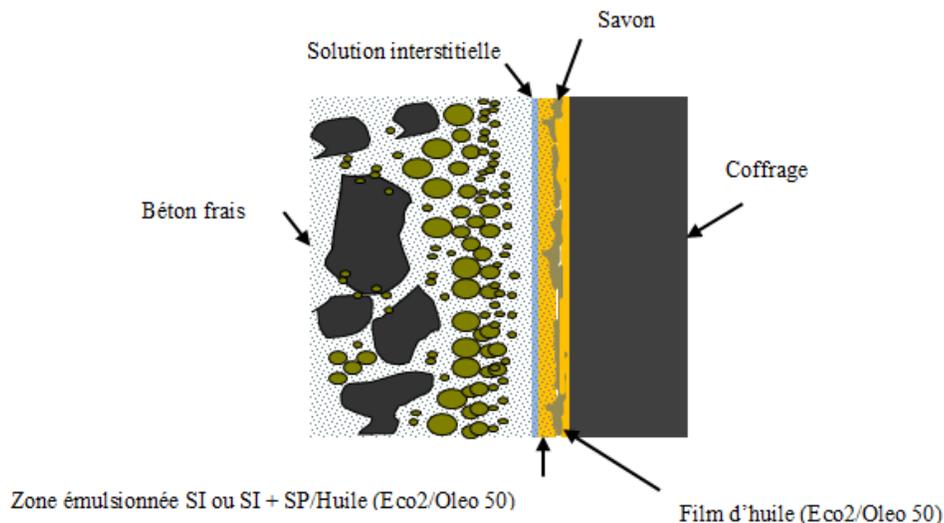


Figure IV-9 : Milieux présents à l'interface béton/huile/coffrage [1].

IV.5 Extraction de la solution interstitielle

Un prélèvement de la solution interstitielle des bétons est nécessaire pour la reconstitution des milieux présents à l'interface béton/huile/coffrage.

Pour récupérer la solution interstitielle à l'interface béton/coffrage, un dispositif expérimental a été mis en place (Figure IV-10). Il est constitué d'un porte échantillon du tribomètre, d'une plaque et d'un disque perforé munit d'une toile de maille de $80 \mu\text{m}$ et de deux couvercles. Le principe de la méthode consiste à fixer le dispositif sur le tribomètre. Le béton frais est introduit en trois couches dans les porte-échantillon légèrement huilé. Chaque couche est piquée 25 fois. La pression de contact est ensuite appliquée sur l'échantillon à l'aide du vérin. Au bout de 10 secondes de la mise en pression du système, la pression est annulée. En fin, l'eau présente à l'interface est évacuée dans un récipient pour être pesée avec une balance de 1/1000 de précision.

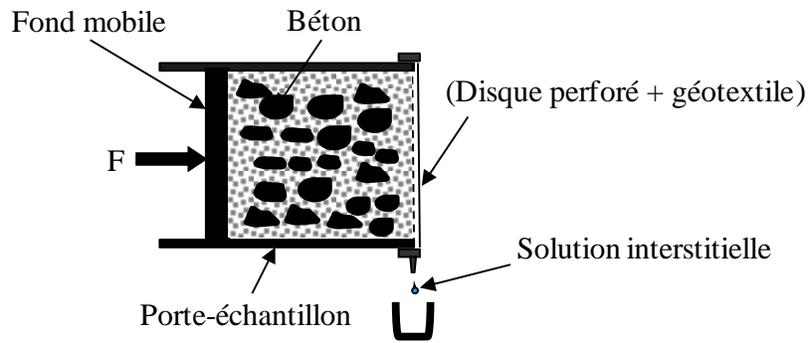


Figure IV-10 : Dispositif expérimental de l'essorage du béton frais.

IV.5.1 Effet de la pression

L'eau collectée est exprimée en pourcentage, ce dernier représente le rapport de l'eau collectée par l'eau initialement présente dans l'échantillon lors d'un l'essai. Le calcul a été réalisé à l'aide de l'équation suivante :

$$\%E_c = \frac{M_c}{M_t} \times 100 \quad \text{IV-4}$$

Avec :

$\%E_c$: pourcentage de l'eau collectée ;

M_c : masse de l'eau collectée ;

M_t : masse de l'eau présente dans le porte-échantillon. Elle est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$M_t = \frac{V_{\text{porte-échantillon}} \times M_{\text{eau total (dans 1 m}^3 \text{ du béton)}}}{1 \text{ m}^3} \quad \text{IV-5}$$

Le Tableau IV-5 présente la quantité d'eau collectée en gramme et en pourcentage pour le béton B28.

	Béton B28
Masse d'eau collectée 90 kPa (g)	17,9
Masse d'eau collectée 70 kPa (g)	17,7
Masse d'eau collectée 50 kPa (g)	15,1
Masse d'eau collectée 30 kPa (g)	4,7
Masse d'eau dans le porte-échantillon (g)	238,85
Quantité d'eau collectée 90 kPa (%)	7,49
Quantité d'eau collectée 70 kPa (%)	7,41
Quantité d'eau collectée 50 kPa (%)	6,32
Quantité d'eau collectée 30 kPa (%)	1,97

Tableau IV-5 : Pourcentage de l'eau collectée pour le béton B28.

La Figure IV-11 présente l'évolution de l'eau collectée en fonction de la pression de contact pour un béton ordinaire dosé à 28% de pâte. Les résultats obtenus montrent que l'eau collectée augmente avec la pression de contact jusqu'à une valeur de 70 kPa au-delà de laquelle la quantité d'eau est constante.

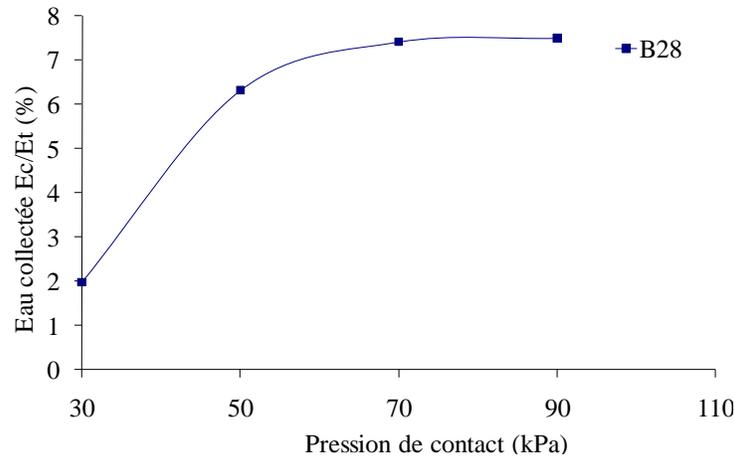


Figure IV-11 : Eau collectée en fonction de la pression de contact pour un béton à 28 % de pâte.

L'eau migre à l'interface sous l'effet de la contrainte normale qui engendre une consolidation de l'échantillon. Ce phénomène favorise la migration de l'eau libre du béton vers la paroi métallique. Lorsque la pression augmente le béton atteint son entassement maximal, les grains ne peuvent plus glisser les uns sur les autres [74] ce qui stabilise la quantité d'eau collectée.

L'allure des autres courbes est similaire pour tous les bétons. Les phénomènes sont donc identiques.

IV.5.2 Effet du volume de pâte

La Figure IV-12 illustre l'eau collectée en fonction de la pression de contact pour les quatre bétons ordinaires. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du volume de pâte permet de collecter moins d'eau à l'interface béton/coffrage.

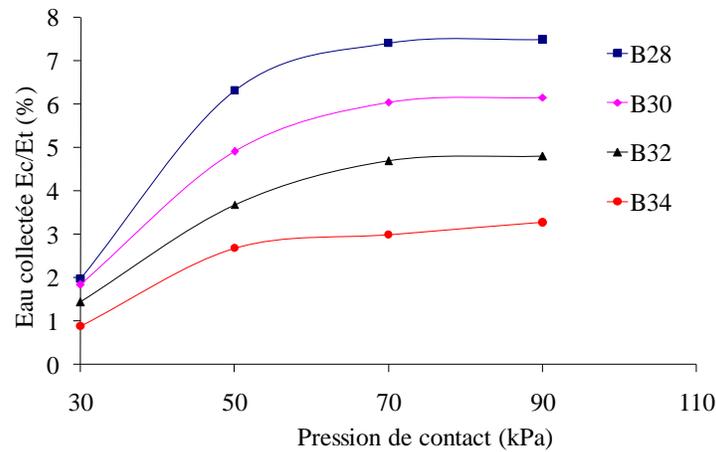


Figure IV-12 : Effet de la pression de contact sur l'écoulement d'eau à l'interface pour les quatre bétons ordinaires.

Il semble que les particules fines limitent l'évacuation de l'eau libre vers l'interface. Afin de mieux comprendre le rôle des fines à l'interface, la Figure IV-13 présente l'eau collectée en fonction de la teneur en fines dans le béton pour les quatre pressions de contact retenues.

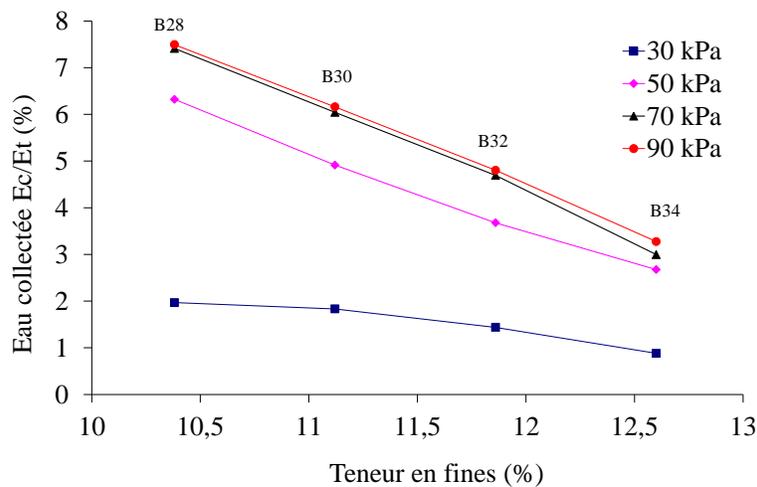


Figure IV-13 : Effet des fines sur l'eau collectée pour chaque pression.

Pour une pression de 30 kPa, une légère augmentation de l'eau collectée est observée quand la teneur en élément fins diminue. Par ailleurs, pour les pressions élevées, le pourcentage des fines dans le béton joue un rôle très important sur la migration de l'eau interstitielle vers l'interface béton/coffrage. L'eau libre s'écoule dans les espaces libres laissés par les grains, assimilable à un réseau de conduites enchevêtrées. Le liquide ne peut pas migrer facilement dans un milieu formé d'un pourcentage important de particules fines, car ce réseau devient trop étroit pour permettre l'infiltration de l'eau interstitielle vers le coffrage. Leow [75] a trouvé des résultats identiques en faisant des essais avec des coffrages perméables contrôlés. Ses résultats

confirment que l'augmentation du volume de pâte diminue le pourcentage de l'eau interstitielle à l'interface béton/coffrage.

IV.5.3 Effet du dosage en superplastifiant

Afin de connaître le comportement du superplastifiant dans un béton et son effet sur la migration de l'eau libre du béton vers l'interface béton/paroi, les quatre bétons adjuvés et le béton autoplaçant ont été étudiés. La Figure IV-14 montre l'évolution de l'eau collectée à l'interface avec la pression de contact pour les cinq bétons testés. Les résultats obtenus montrent que la quantité d'eau collectée à l'interface béton/coffrage est affectée par le volume de pâte et le dosage en superplastifiant.

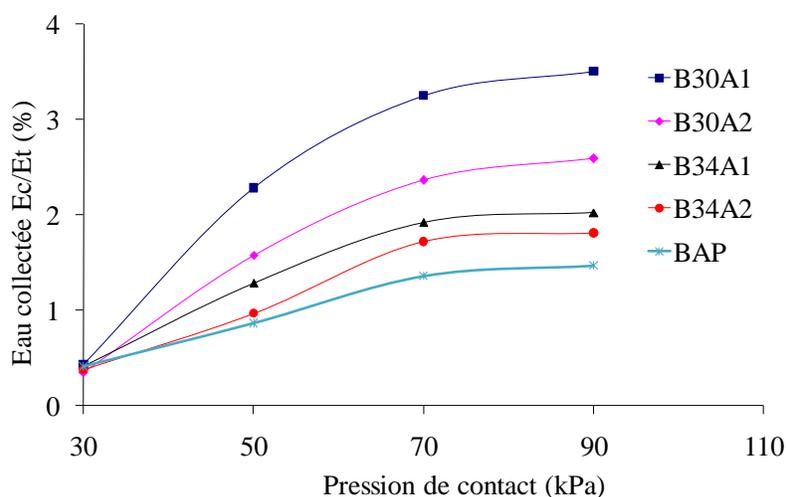


Figure IV-14 : Effet de la pression de contact sur l'écoulement d'eau à l'interface pour les quatre bétons adjuvés et le BAP.

Pour les bétons à volume de pâte constant, le rapport E/L détermine l'écoulement de l'eau vers l'interface. Les résultats montrent que l'eau collectée est plus faible pour le béton autoplaçant. Il semble donc, que l'eau collectée soit également influencée par la teneur en fines de ces bétons adjuvés.

La Figure IV-15 présente l'évolution de l'eau collectée en fonction de la teneur en fines pour les bétons testés à différentes pressions. Le pourcentage de l'eau ayant migrée vers l'interface béton/coffrage diminue lorsque la teneur en fines augmente.

Pour une pression de 30 kPa, la quantité d'eau collectée est identique quelle que soit la formulation testée. Sous l'effet de cette pression, l'échantillon est partiellement sollicité.

Pour les pressions élevées, une diminution de la quantité d'eau à l'interface est observée quand la teneur en fines augmente.

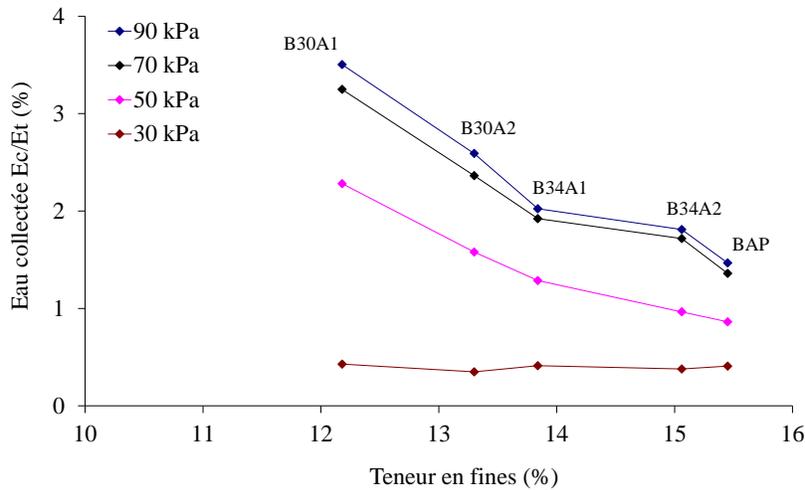


Figure IV-15 : Effet des fines sur l'eau collectée pour chaque pression.

Rappelons que le dosage en superplastifiant a été ajusté dans les bétons en diminuant le rapport E/L et en augmentant la teneur en fines. Ce phénomène contribue à diminuer la quantité d'eau à l'interface lorsque le dosage en superplastifiant augmente pour les bétons à volume de pâte constant.

IV.5.4 Mesure du pH des solutions interstitielles

Platel [76] a montré que l'augmentation du rapport E/L n'affecte pas la solution du béton. La solution interstitielle est en effet, saturée en calcium quel que soit le rapport E/L. Sa concentration ne change donc pas. Pour cela, trois bétons à 30 % de pâte et un béton autoplaçant ont été retenus pour cette étude ; le béton ordinaire B30, les deux bétons adjuvantés B30A1 et B30A2 et le BAP.

La mesure du pH permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Le pH des solutions interstitielles (eau + liant) a été mesuré à la température ambiante (20 °C) à l'aide d'un conductimètre équipé d'une sonde adaptée. Afin de vérifier l'évolution du pH en fonction du temps, des mesures ont été réalisées toutes les 12h durant 4 jours. Les résultats obtenus ont montré que le pH est stable durant les 4 jours de stockage. Le Tableau IV-6 montre la moyenne des 8 mesures effectuées.

	Teneur en SP (% SP/ciment)	pH (moyenne sur 5 mesures)
B30	0	12,7 ± 0,1
B30A1	0,7	13 ± 0,223
B30A2	1,14	12,9 ± 0,07
BAP	1,64	13,1 ± 0,316

Tableau IV-6 : Mesure du pH des solutions interstitielles en fonction de la teneur en superplastifiant.

Les différentes solutions interstitielles de béton présentent un pH basique proche de 13, stable dans le temps. De plus, les variations de pH observées sont trop faibles pour être attribuées à la formation de carboxylates à partir du superplastifiant (éther d'acide polycarboxylique). Des résultats similaires ont été trouvés par Noel [77]. Il a montré que la solution interstitielle du ciment possède un pH de l'ordre de 13.

IV.6 Analyses des milieux interstitiels reconstitués

IV.6.1 Composition des milieux interstitiels

L'objectif est d'étudier les propriétés des milieux interstitiels reconstitués en fonction du dosage en superplastifiant et de la teneur en huile. A partir des solutions interstitielles des bétons (bétons ordinaires, bétons adjuvantés et BAP) prélevées, les milieux interstitiels ont été préparés en ajoutant les constituants suivants :

- entre 10 et 60% d'huile de démoulage,
- entre 0 à 1,64 % (extrait sec en masse par rapport au ciment) du superplastifiant (0% dans le cas d'un béton non adjuvanté).

Ainsi, quatre milieux interstitiels et un milieu de référence (eau distillée + huile de démoulage) ont été formulés avec les teneurs présentées dans Tableau IV-7.

Milieux interstitiels (MI) – Solution Interstitielle + Huile					(%) de la solution interstitielle	(%) d'huile	
MI-BAP	MI-B30A2	MI-B30A1	MI-B30	MI-REF	10H -90SI	90	10
					20H -80SI	80	20
					40H -60SI	60	40
					60H -40SI	40	60

Tableau IV-7 : Milieux interstitiels formulés.

IV.7 Mesure de l'angle de goutte

IV.7.1 Définition

Une goutte d'un liquide déposée sur la surface plane d'un solide, est soumise à trois interactions : la tension superficielle qui tend à la rassembler sur elle-même, son poids qui a tendance à l'aplatir, et les interactions chimiques entre le liquide et la surface du solide. Le mouillage d'un solide par un liquide est caractérisé par le pouvoir d'étalement du liquide. Si la goutte ne s'étale pas et demeure sous forme de lentille à la surface du substrat, on parle de mouillage partiel car le substrat n'est que partiellement couvert par le liquide. Si la goutte s'étale pour former un film macroscopique et uniforme, on parle de mouillage total car le substrat est complètement recouvert par le liquide

Le but de nos mesures est de déterminer les caractéristiques de mouillabilité des milieux interstitiels vis-à-vis du film résiduel, en fonction de la formulation du béton et la nature de l'huile de démoulage. Cette propriété va permettre de prédire les affinités entre milieux.

IV.7.2 Principe de mesure

La méthode décrite par Young en 1805 [78] reste la plus précise pour déterminer expérimentalement la tension superficielle entre un liquide et un solide. La forme d'une goutte déposée sur la surface d'un solide est régie par trois paramètres : la tension interfaciale solide-liquide γ_{SL} , la tension interfaciale solide-vapeur γ_{SV} (γ_S) et la tension interfaciale liquide-vapeur γ_{LV} (γ_L). Ces trois grandeurs sont reliées par l'équation d'Young à l'équilibre des tensions interraciales au point de contact tripartisme (Figure IV-16).

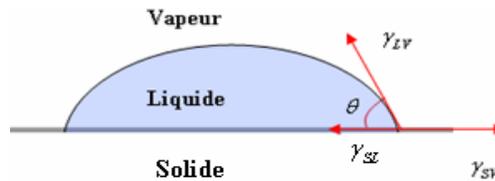


Figure IV-16 : Schéma des forces agissant sur une goutte déposée à la surface d'un matériau.

L'équilibre des forces linéiques s'appliquant à la ligne de contact, projeté perpendiculairement à la ligne de contact donne alors la relation de Young-Dupré liant l'angle de contact aux différentes énergies de surface :

$$\gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta_e + \gamma_{sv} = 0 \quad \text{IV-6}$$

Donc la valeur l'angle de contact statique peut être calculée par cette relation :

$$\cos \theta_e = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad \text{IV-7}$$

IV.7.3 Méthode expérimentale

Afin de déterminer l'angle de contact des matériaux, un goniomètre de poche de type PGX a été utilisé dans cette étude. Cet appareil mesure l'angle de contact à l'interface entre une goutte de liquide et la surface du substrat sur laquelle elle est déposée (Figure IV-17). Le PGX est un instrument automatisé pour faire des mesures des angles de contact de grands échantillons à trois dimensions sans découper les échantillons. L'emploi d'une unité de dosage extérieure permet de donner la possibilité d'étudier différents liquides.

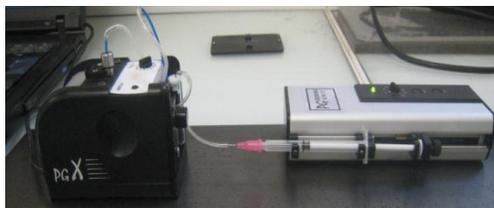


Figure IV-17 : Goniomètre PGX.

Les essais ont été effectués avec :

- le superplastifiant sur une plaque non huilée,
- le superplastifiant sur une plaque huilée,
- les huiles de démoulage sur une plaque non huilée,
- les solutions interstitielles sur une plaque non huilée,
- les milieux interstitiels sur une plaque huilée.

IV.7.4 Angle de contact des huiles et du superplastifiant

Les angles de goutte ont été mesurés sur la même plaque utilisée pour les essais de frottement au tribomètre. Le Tableau IV-8 montre les résultats obtenus pour le superplastifiant et les huiles sans et avec huilage de la plaque métallique.

Angle de contact (°)	Plaque non huilée			Plaque huilée	
	Eco2	Oleo50	SP	Eco2	Oleo50
				SP	SP
	18,3	12	83,2	45,3	45

Tableau IV-8 : Angle de contact des huiles et le superplastifiant.

Il apparaît que l'huile minérale s'étale un peu mieux que l'ester végétal, sur la plaque métallique. De plus, l'angle de goutte du superplastifiant est diminué sur la plaque huilée traduisant une certaine affinité vis-à-vis du film d'huile.

IV.7.5 Angle de goutte de la solution interstitielle des bétons

Les résultats des angles de contact pour les solutions interstitielles déposées sur la plaque non huilée sont rassemblés dans le Tableau IV-9. Le milieu de référence est constitué d'eau distillée. On observe que les angles de contact diminuent lorsque la teneur en superplastifiant augmente.

Solution interstitielle	SI (REF)	SI (B30)	SI (B30A1)	SI (B30A2)	SI (BAP)
Angle de contact (°)	70,2	67,1	65,2	62,4	60,1

Tableau IV-9 : Angle de contact des solutions interstitielles et l'eau distillée.

Des mesures d'angle de contact effectuées sur des surfaces huilées (pulvérisée puis raclée) à l'aide de l'huile végétale (Eco2) et de l'huile minérale (Oleo50) sont présentées dans la Figure IV-18.

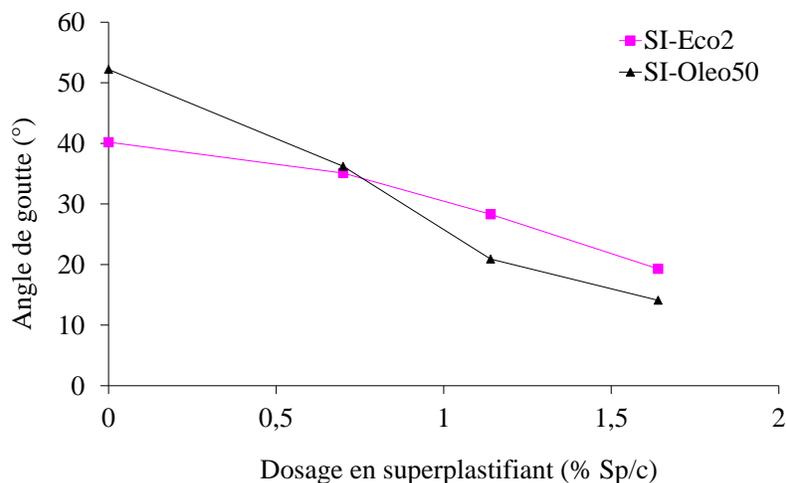


Figure IV-18 : Evolution de l'angle de contact en fonction du dosage en superplastifiant.

Les résultats montrent que le pouvoir tensio-actif du superplastifiant contenu dans les solutions interstitielles a tendance à abaisser l'angle de contact entre la solution interstitielle et la plaque huilée. Ainsi, la mouillabilité de la solution interstitielle vis-à-vis de la surface augmente avec la teneur en SP.

Avec un dosage en superplastifiant supérieur à 0,7%, la solution interstitielle s'étale mieux sur les surfaces huilées par l'huile végétale (Eco2). Pour des dosages en superplastifiant inférieurs à 0,7%, c'est l'huile minérale (Oleo50) qui permet d'obtenir une meilleure affinité avec la surface.

IV.7.6 Angle de goutte des milieux interstitiels

Pour identifier l'effet de la présence des ions carboxylates provenant du ciment, quatre milieux interstitiels ont été préparés à l'aide d'eau distillée (milieux de référence). Les teneurs en huile de ces milieux sont identiques à ceux reconstitués avec la solution interstitielle des bétons (Tableau IV-10).

Milieux interstitiels					(%) d'eau distillée	(%) de l'huile	
MI-BAP	MI-B30A2	MI-B30A1	MI-B30	MI-REF	10H -90SI	90	10
					20H -80SI	80	20
					40H -60SI	60	40
					60H -40SI	40	60

Tableau IV-10 : Milieux interstitiels formulés.

La mesure des angles de contact des milieux interstitiels a été réalisée sur une surface huilée (Figure IV-19). Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en huile diminue l'angle de contact des milieux interstitiels (meilleure mouillabilité).

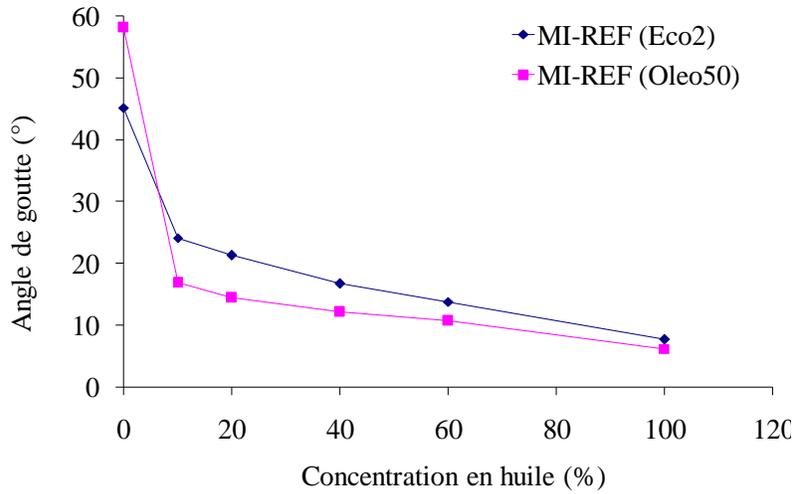


Figure IV-19 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la teneur en huile pour MI-REF.

La Figure IV-20 présente que l'évolution de l'angle de contact en fonction de la concentration en huile pour les milieux formés à base de la solution interstitielle du béton frais (B30, B30A1, B30A2 et BAP).

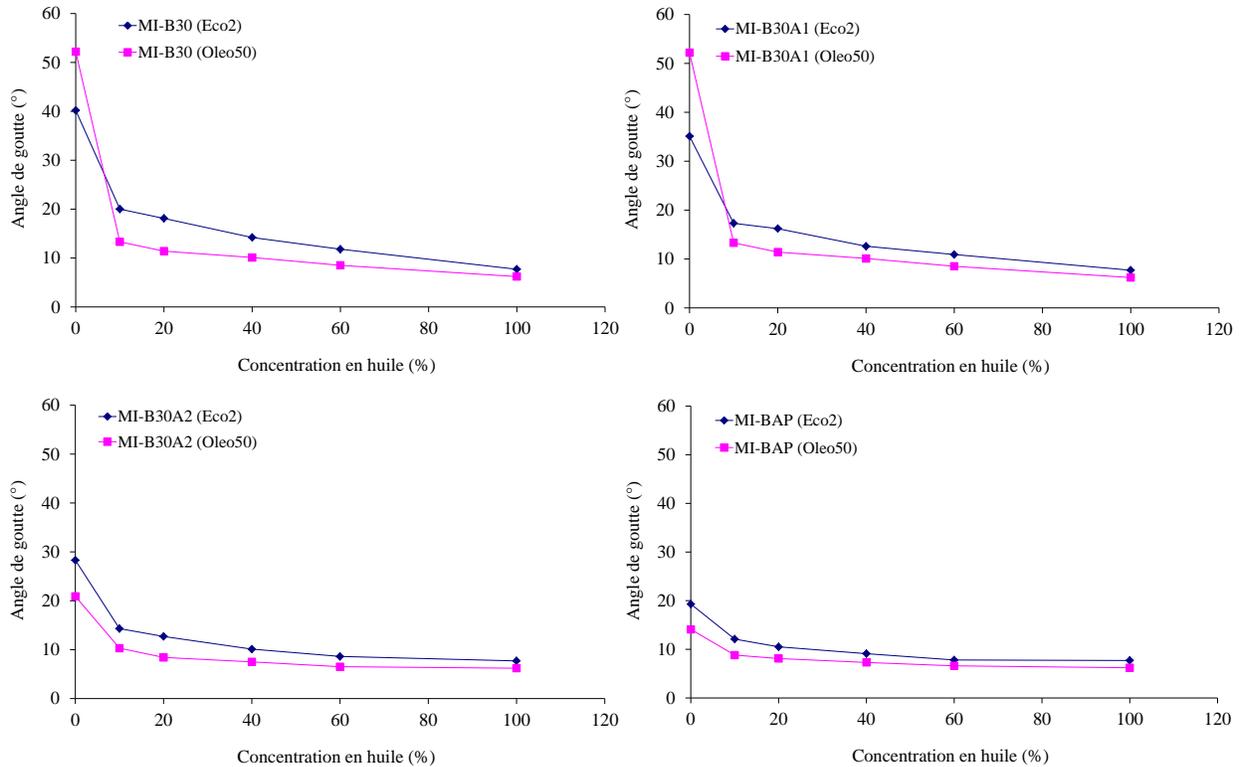


Figure IV-20 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la teneur en huile.

Les milieux à base d'eau distillée fournissent des résultats proches à ceux obtenus en présence de la solution interstitielle des bétons ordinaire. Ainsi, le pouvoir mouillant est favorisé par l'utilisation de l'huile minérale (Oleo50), par l'augmentation du dosage en superplastifiant et par la teneur en huile du milieu.

L'influence du dosage en superplastifiant sur la mouillabilité entre le milieu et la plaque a été évaluée selon la Figure IV-21.

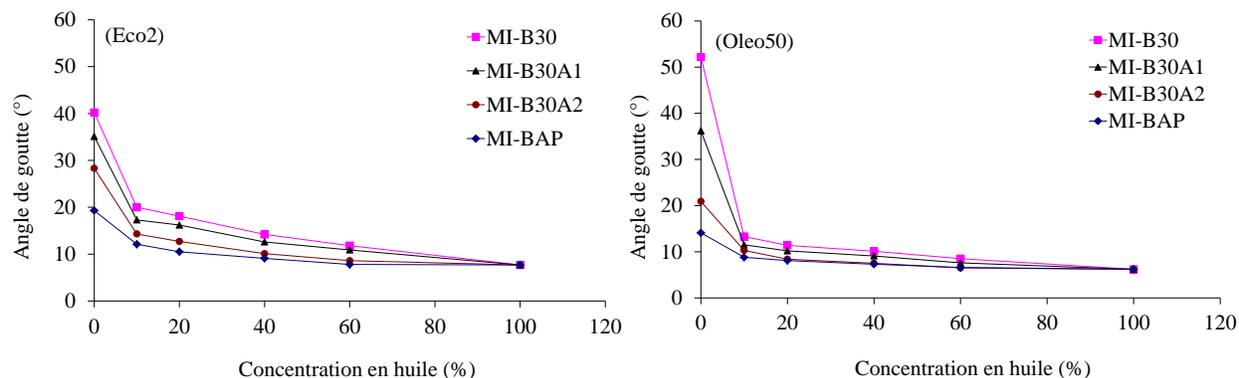


Figure IV-21 : Evolution de l'angle de contact en fonction de la concentration en huile -effet du superplastifiant.

Pour des teneurs en huile supérieures à 60%, les résultats obtenus pour les deux huiles sont très proches. De plus, quelle que soit la nature de l'huile, l'augmentation du dosage en superplastifiant augmente le pouvoir mouillant des milieux interstitiels.

Lorsque la plaque métallique est recouverte d'une couche d'huile (Eco2 et Oleo50), sa surface n'est pas totalement hydrophobe à cause de la présence d'agents tensio-actifs qui émulsionnent une partie des deux phases (huile et solution interstitielle). Ces molécules favorisent l'étalement des milieux interstitiels sur la surface de la plaque métallique [79], se traduisant par une réduction de l'angle de contact.

IV.8 Rhéologie des milieux interstitiels

IV.8.1 Protocole expérimental

Un rhéomètre HAAKE VT550 fonctionnant à vitesse de cisaillement imposée a été utilisé pour déterminer les paramètres rhéologiques des milieux interstitiels. Un protocole identique à celui des deux huiles a été reproduit pour tous les milieux interstitiels. Il est composé d'une rampe en vitesse croissante et une descente en sept paliers à vitesse décroissante sans précisailier le matériau. Les durées et amplitudes de chaque segment du protocole sont respectivement 20 s et 90 1/s. L'opération est répétée trois fois pour chaque échantillon.

IV.8.2 Résultats obtenus

La Figure IV-22 présente un exemple de l'évolution de la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour le milieu MI-B30 (eau interstitielle + huile végétale (Eco2)).

On remarque que la contrainte de cisaillement des milieux interstitiels augmente quand la concentration en huile augmente, c'est-à-dire avec une concentration volumique en huile croissante dans l'émulsion. De plus, les résultats obtenus montrent que la viscosité apparente est constante et indépendante du taux de cisaillement. Les milieux préparés possèdent donc un comportement newtonien sur toute la gamme de vitesse de cisaillement explorée, quelle que soit la teneur en huile.

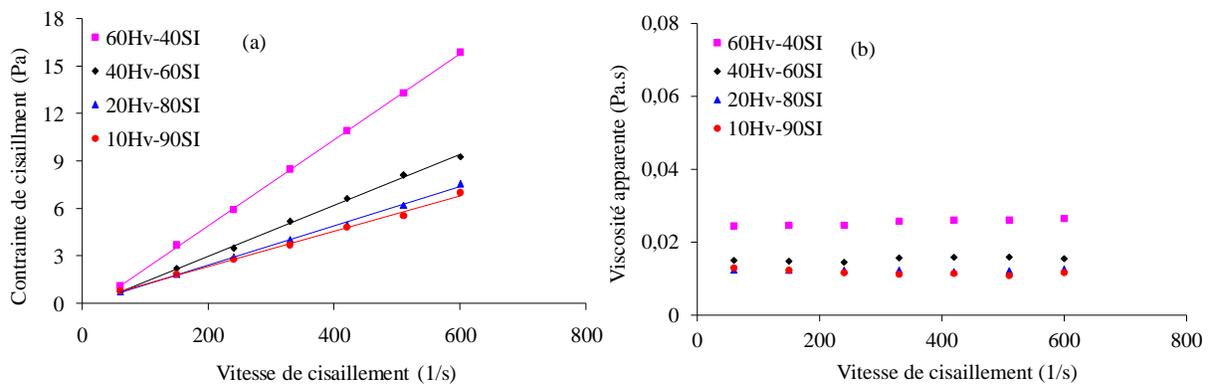


Figure IV-22 : Variation de la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement pour le milieu MI-B30 avec l'huile végétale Eco2.

Les résultats obtenus pour les autres milieux interstitiels ont la même allure que le milieu MI-B30 avec l'huile végétale (Eco2). Le comportement de tous les milieux interstitiels sont newtonien quels que soient la teneur en huile et le dosage en en superplastifiant.

IV.8.2.1 Viscosité apparente des milieux interstitiels

La Figure IV-23 présente une comparaison de la variation de la viscosité en fonction de la concentration en huile entre le milieu interstitiel de référence et celui des bétons. La comparaison des résultats montre que les courbes ont la même allure quel que soit le milieu testé.

La présence du ciment dans la solution interstitielle permet d'augmenter la viscosité des milieux interstitiels pour les deux huiles. Ce phénomène est plus prononcé pour les milieux reconstitués avec l'huile végétale (Eco2). Pour les milieux reconstitués avec l'huile minérale (Oleo50), la différence entre les viscosités est négligeable.

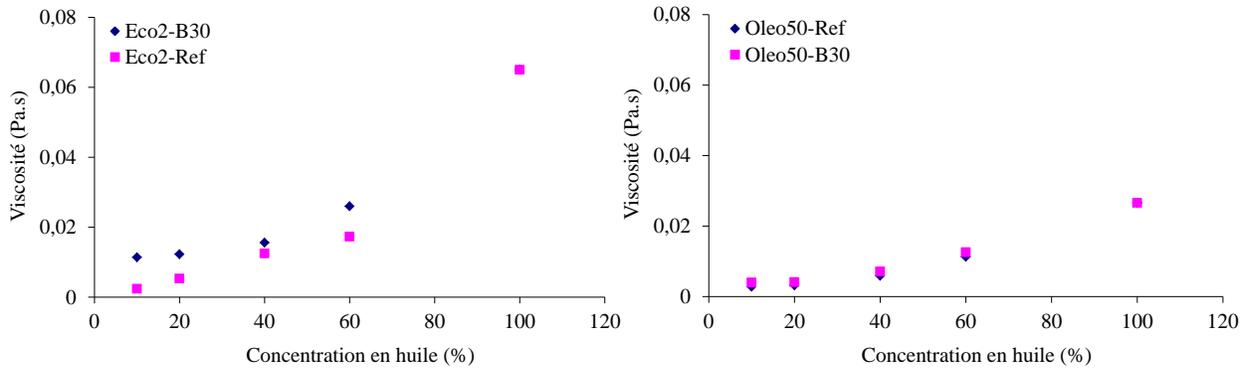


Figure IV-23 : Comparaison de la variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile entre les milieux MI-B30 et MI-REF pour les deux huiles.

La Figure IV-24 illustre la variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les milieux MI-B30 avec les deux huiles. Les résultats montrent que la viscosité est plus élevée en présence de l'huile végétale (Eco2).

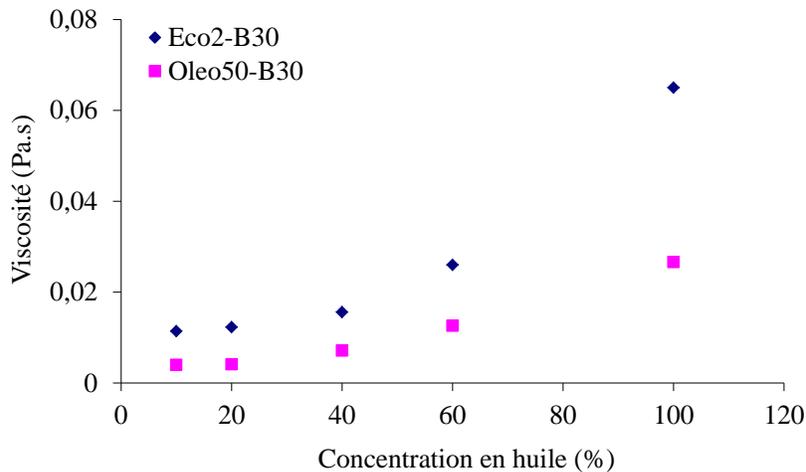


Figure IV-24 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les milieux MI-B30 avec les deux huiles.

En outre, la viscosité des milieux interstitiels formés avec l'huile végétale (Eco2) est plus élevée que celle des milieux formés avec l'huile minérale (Oleo50). L'augmentation de la viscosité est plus prononcée pour des concentrations supérieures à 40% d'huile. Ce résultat peut s'expliquer par une formation accrue de savons avec une teneur croissante en esters présents dans l'huile végétale (Eco2). Ces savons issus des esters par saponification tendent à épaissir le milieu.

IV.8.2.2 Influence du superplastifiant

L'influence du superplastifiant sur le comportement rhéologique des milieux interstitiels est présentée sur la Figure IV-25, avec la variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les milieux MI-B30A1 et MI-B30A2.

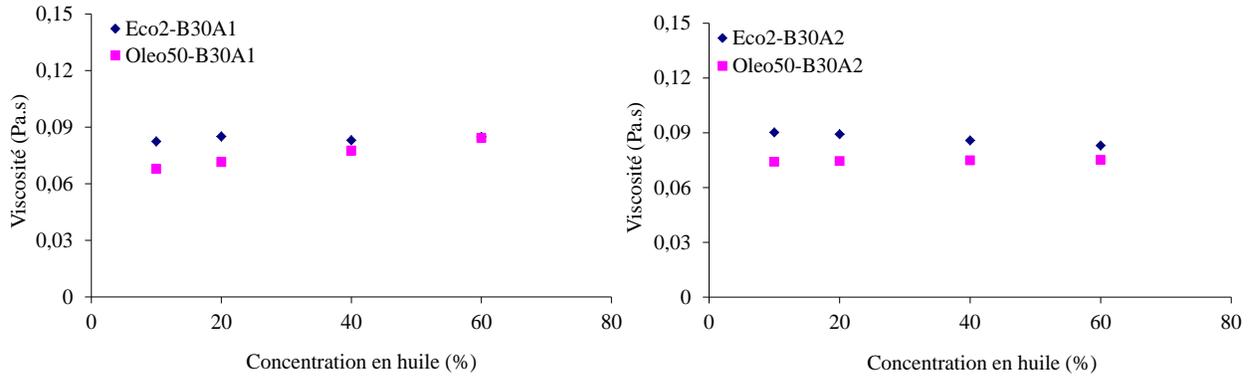


Figure IV-25 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les deux huiles.

Pour le milieu interstitiel MI-B30A1 formé avec huile minérale (Oleo50), la viscosité augmente légèrement avec la concentration en huile.

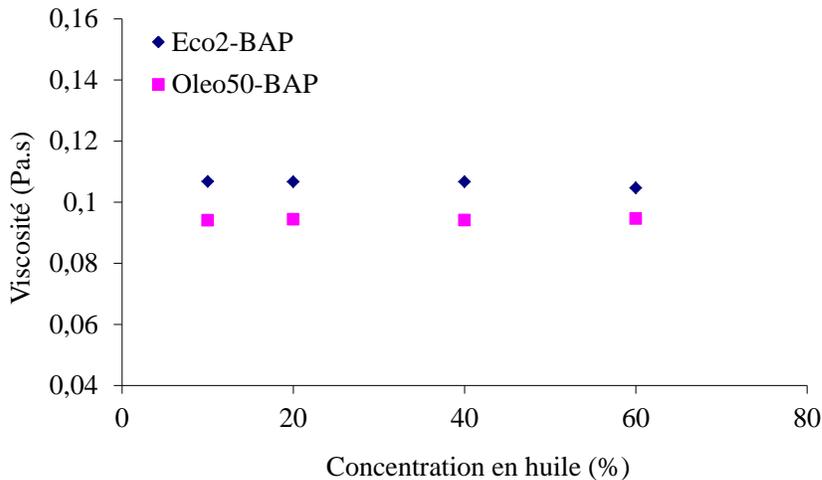


Figure IV-26 : Variation de la viscosité en fonction de la teneur en huile pour les deux huiles-MI-BAP.

Dans le cas présent, les résultats montrent également que la viscosité des milieux interstitiels reste constante et indépendante de la teneur en huile quel que soit le dosage en superplastifiant (Figure IV-25 et IV-26). Les milieux reconstitués avec l'huile végétale (Eco2) est toujours plus visqueux que ceux formulés à base d'huile minérale (Oleo50).

Les Figure IV-27 présente la variation de la viscosité des milieux interstitiels en fonction du dosage en superplastifiant pour chaque concentration en huile.

Il semble que l'accroissement du dosage en superplastifiant permet d'augmenter légèrement la viscosité des milieux interstitiels.

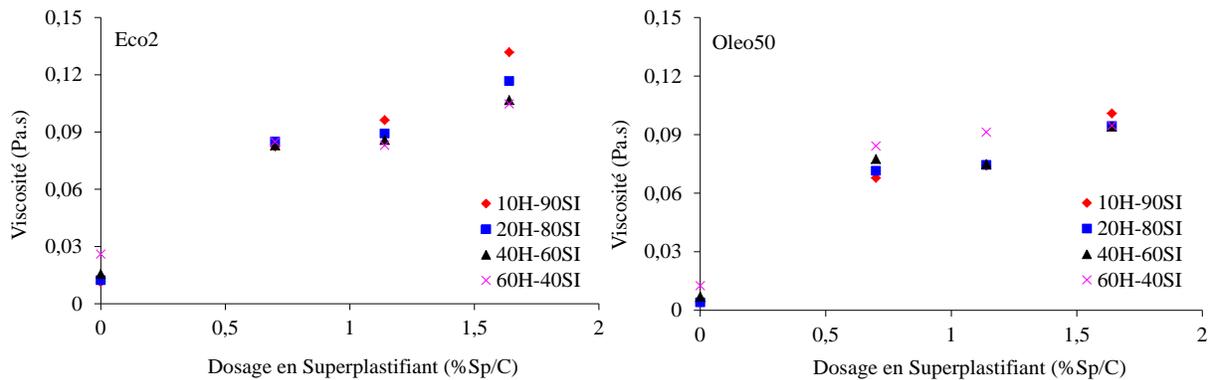


Figure IV-27 : Viscosité en fonction du dosage en superplastifiant pour les deux huiles.

L'ajout d'un constituant supplémentaire dans la formulation d'un béton augmente la complexité du système. Lorsque le dosage en superplastifiant augmente dans un béton, le rapport E/L diminue ce qui permet d'augmenter la concentration en sulfates alcalins qui ont des solubilités très importantes dans le liquide interstitiel, d'après les résultats de Platel [76].

Dans cette étude les bétons retenus ont un rapport E/L qui dépend du dosage en superplastifiant. La variation la plus importante est donc la concentration en sulfates alcalins dans la solution interstitielle. Ce phénomène conduit à une augmentation de la viscosité en présence du superplastifiant non absorbé par les grains de ciment dans la solution interstitielle des bétons frais. Par conséquent, en présence du superplastifiant, la viscosité dépend essentiellement des carboxylates formés à partir du superplastifiant, ce qui confirme l'hypothèse de la formation du savon (3).

IV.9 Etude des milieux interstitiels au voisinage de la paroi

La composition du milieu interstitiel a été estimée à partir des données obtenues lors des essais pour prélever la solution interstitielle et d'après l'épaisseur du film d'huile. En effet, les essais effectués sur l'extraction de la solution interstitielle du béton frais à l'interface béton/huile/coffrage ont permis d'identifier la quantité d'eau réelle présente à l'interface lors du processus de frottement.

Par ailleurs, nous avons déterminé que la pulvérisation des huiles sur la plaque métallique du tribomètre conduit à des épaisseurs de 4 µm environ. Nous pouvons alors calculer un pourcentage d'huile dans la solution interstitielle selon l'équation suivante :

Pour l'huile

$$\%H = \frac{e \times S_C}{e \times S_C + M_{SI}} \times 100$$

IV-8

Où %H représente le pourcentage de l'huile de démoulage, e l'épaisseur de l'huile de démoulage, S_c la surface de contact béton/paroi (113,04 cm²), et M_{SI} la masse de la solution interstitielle présente à l'interface béton/coffrage.

Pour la solution interstitielle

$$\%SI = 100 - \%H$$

IV-9

Avec %SI le pourcentage de la solution interstitielle à l'interface béton/paroi.

Le Tableau IV-11 illustre la nature des milieux interstitiels qui peuvent être formés à l'interface béton/coffrage en présence des huiles de démoulage.

Bétons	Pressions (kPa)	Teneur en solution interstitielle (%)	Teneur en huile (%)
B28	30	97,54	2,46
	50	97,51	2,49
	70	97,09	2,91
	90	91,22	8,78
B30	30	97,22	2,78
	50	97,17	2,83
	70	96,54	3,46
	90	90,32	9,68
B32	30	96,66	3,34
	50	96,59	3,41
	70	95,69	4,31
	90	89,66	10,34
B34	30	95,46	4,54
	50	95,06	4,94
	70	94,50	5,50
	90	84,99	15,01
B30A1	30	94,95	5,05
	50	94,58	5,42
	70	92,45	7,55
	90	84,70	15,30
B30A2	30	92,93	7,07
	50	92,30	7,70
	70	88,90	11,10
	90	83,89	16,11
B34A1	30	92,53	7,47
	50	92,17	7,83
	70	88,73	11,27
	90	83,60	16,40
B34A2	30	91,21	8,79
	50	90,78	9,22
	70	84,68	15,32
	90	83,43	16,57
BAP	30	90,07	9,93
	50	89,37	10,63
	70	84,20	15,80
	90	82,60	17,40

Tableau IV-11 : Milieux interstitiels présents à l'interface béton/coffrage.

Les résultats montrent que dans le cas des bétons testés, les milieux à l'interface béton/huile/coffrage contiennent une teneur en huile (Eco2 et Oleo50) comprise entre 2 et 17%.

Nous nous limiterons donc à des teneurs de cet ordre, pour étudier le comportement de milieux interstitiels modèles et pour identifier les processus physico-chimiques en jeu. De nouveaux milieux interstitiels ont été ainsi formulés avec 5 ou 10% en huile (Eco2 et Oleo50) à partir des quatre solutions interstitielles proviennent B30, B30A1, B30A2 et BAP.

IV.9.1 Formation de savon

Il apparaît que la formation de savons est bien le processus qui gouverne les propriétés du milieu interstitiel et qui induit ainsi une action chimique dans l'opération de décoffrage. Or, les phénomènes qui interviennent ne sont jamais décrits avec précision dans la littérature, c'est pourquoi, il nous paraît indispensable d'apporter des données complémentaires.

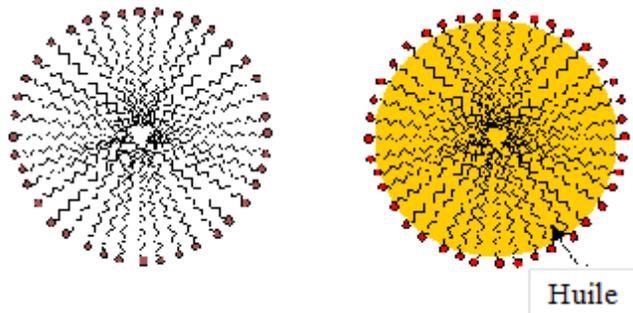
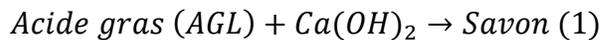


Figure IV-28 : Structure chimique d'un carboxylate de calcium.

Les savons sont des carboxylates de calcium (Figure IV-28) et plus précisément des sels d'acides gras, qui ont deux origines :

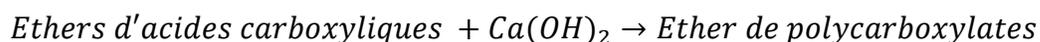
- les acides gras libres (acidifiant) ajoutés dans la formulation décoffrante végétale ou minérale), qui au contact de la solution interstitielle basique subissent une salification selon le schéma suivant :



- les esters (ou les triglycérides) présents dans la formulation d'origine végétale qui, en milieu basique, subissent une saponification selon l'équation suivante :



- On rajoutera que les adjuvants du béton qui appartiennent à la famille des éthers d'acides polycarboxyliques sont susceptibles également de subir une salification sur leurs fonctions acides selon l'équation ci-dessous:



Dans tous les cas, la quantité de savon formé dépend du pH du milieu et du pKa de l'acide suivant la formule :

$$pH = pKa + \frac{\log[B]}{\log[A]} \quad \text{IV-10}$$

Avec : A et B représentent les concentrations respectives en l'acide (A) et en la base conjuguée (B).

Par exemple, le pKa de l'acide oléique souvent utilisé comme acidifiant est de 4.8. Ces savons ont une texture épaisse qui se dépose sur la paroi huilée du coffrage. A l'échelle du laboratoire, le dépôt se forme sur les parois des flacons contenant les milieux interstitiels modèles.

Les savons grâce à leur pouvoir filmogène, jouent un rôle au niveau de la réduction des frottements. Ils ont également des propriétés tensio-actives qui sont à l'origine de la formation d'une émulsion entre la solution interstitielle et l'agent décoffrant. Il en résulte une organisation interfaciale à deux niveaux :

- la formation d'une émulsion présente dans le milieu interstitiel, organisée sous forme de micelles huiles dans eau,
- la formation de couches superficielles de molécules d'esters et de savons (Figure IV-29) qui s'orientent en fonction de leur tête polaire.

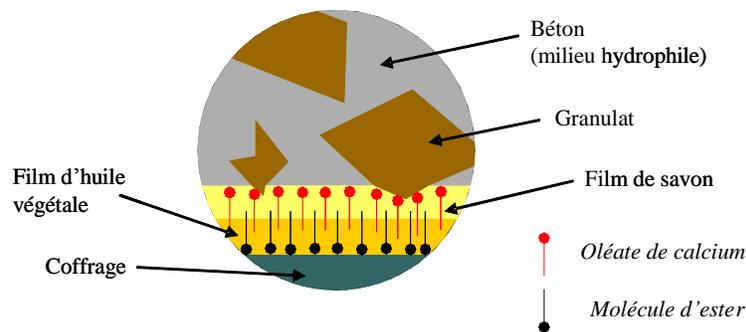


Figure IV-29 : Orientation des molécules d'esters et de savons au voisinage de la paroi [1] [28].

En définitive, la formulation Eco2 qui contient un ester associé à un acide gras (oléine) va générer la formation des savons 1 et 2. La formulation Oleo50 contient un acide gras en faible proportion (IA faible) qui produit du savon (1).

Les savons et le superplastifiant (SP) vont contribuer, de façon différente, à la formation et à la stabilisation de l'émulsion (Figure IV-30).

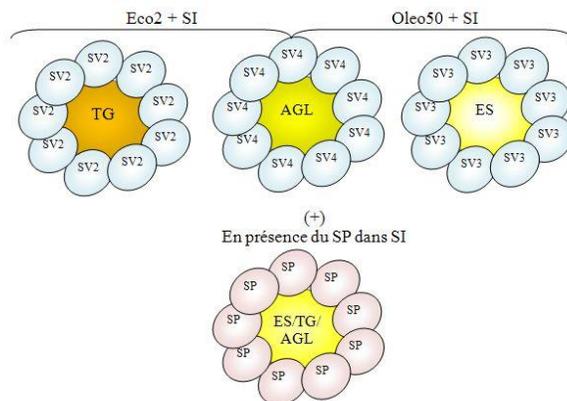


Figure IV-30 : Schéma des micelles potentiellement présentes dans le milieu.

IV.9.2 Observations visuelles des milieux interstitiels

10 ml de milieux interstitiels ont été préparés, agités puis laissés au repos pendant 5 min. Ils se présentent sous l'apparence d'émulsions plus ou moins stables dans le temps, comme le montre la Figure IV-31.

On observe une démixtion progressive des milieux avec un dépôt de savon sur la paroi des flacons. Les quantités de savon déposées sur les parois ont été évaluées avec le flacon en position horizontale.

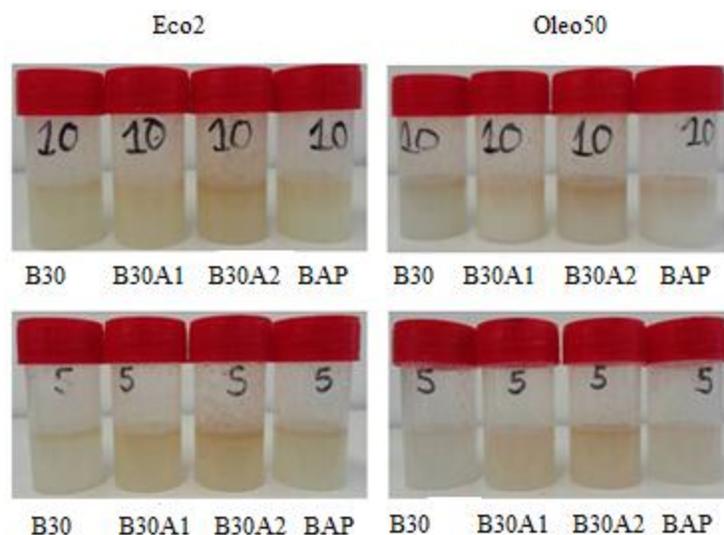


Figure IV-31 : Milieux interstitiels reconstitués

Les milieux les plus émulsionnés correspondent aux concentrations en huile de 10% (huiles Eco2 ou Oleo50). En comparant la quantité d'émulsion obtenue, on a le classement suivant : Oleo50-10% > Eco2-10% > Oleo50-5% > Eco2-5%. La présence de tensioactifs dans le milieu permet donc d'émulsionner plus de 5% d'huile.

La présence du superplastifiant dans la solution interstitielle contribue d'une manière significative à émulsionner les milieux, comme observé clairement avec le BAP (Figure IV-32). Ainsi, les milieux B30A2 et B30 (sans SP ou à faible teneur) présentent plus rapidement un phénomène de déphasage, avec formation d'une couche jaune superficielle. Un crémage (émulsion épaisse) a été principalement observé pour les milieux contenant une forte teneur en superplastifiant, pour les deux huiles.

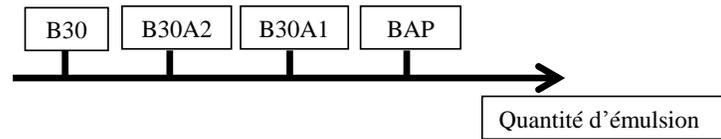


Figure IV-32 : Echelle pour apprécier la quantité d'émulsion formée pour 10% d'Oleo50.

La quantité de savon déposée sur les parois des flacons est accrue avec une teneur de 10% en huile. De plus, les milieux interstitiels formés avec l'huile Eco2 présentent davantage de savon par rapport à ceux formés avec l'huile minérale (Oleo50). La différence entre les deux huiles est plus difficile à percevoir pour les milieux comportant 5% d'huile.

La quantité de savon produite est également favorisée par la présence du superplastifiant (SP) (Figure IV-33), mais elle est également effective en l'absence du superplastifiant (SP), comme dans le cas du béton B30.

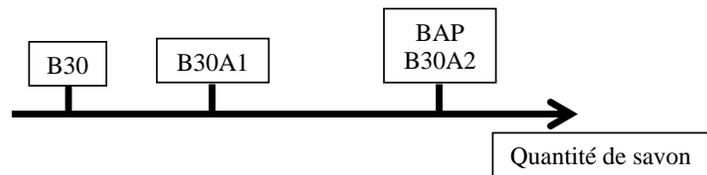


Figure IV-33 : Echelle pour apprécier la quantité de savon formée dans la solution interstitielle préparée avec 10% d'Oleo50 ou 10% d'Eco2.

IV.9.3 Détermination de la quantité de savon

Ces essais ont pour objet d'obtenir une information quantitative relative à la formation de savon liée au contact entre l'huile et la solution interstitielle.

IV.9.3.1 Protocole expérimental

Des flacons séchés et tarés ($M_{F,avant}$) sont remplis par un mélange "solution interstitielle/huile". Ils ont été agités puis laissés au repos pendant le temps de mise en contact choisi (1 min, 12 heures 24 heures). Les flacons sont ensuite pesés pour déterminer la masse de savon déposée sur les parois ($M_{F,après}$). La masse de savon a été déterminée comme suit :

$$M_S = M_{F,après} - M_{F,avant} \quad \text{IV-11}$$

Où :

M_s : la masse de savon

Le rapport $\frac{M_s}{M_h} \times 100$ représente alors le pourcentage massique de savon M_s formé par rapport à la masse initiale d'huile M_h .

IV.9.3.2 Résultats

La mesure après 1 min correspond au premier contact solution interstitielle/huile qui simule l'interface béton/huile/paroi lors du frottement. Elle est effectuée après l'agitation du milieu interstitiel.

Afin d'estimer la quantité de savon après le durcissement du béton, des mesures à 12h et à 24h ont été effectuées au repos (sans agitation). Le Tableau IV-12 rassemble les masses obtenues après 1 min du contact huile solution interstitielle.

	$M_{F,avant} (g)$	$M_{F,après} (g)$	$M_s (g)$	$\frac{M_s}{M_h} \times 100$	$M_h (g)$
5% d'huile					
B30 - Eco2	9,87	11,12	1,25	13,44	9,3
B30A1- Eco2	9,85	11,38	1,53	16,45	9,3
B30A2 - Eco2	9,9	11,87	1,97	21,18	9,3
BAP - Eco2	9,88	12,06	2,18	23,44	9,3
B30 - Oleo50	9,85	10,4	0,55	6,39	8,6
B30A1- Oleo50	9,86	10,78	0,92	10,69	8,6
B30A2 - Oleo50	9,85	11,15	1,3	15,11	8,6
BAP - Oleo50	9,89	11,26	1,37	15,93	8,6
10 % d'huile					
B30 - Eco2	9,86	11,66	1,8	9,67	18,6
B30A1- Eco2	9,87	12,01	2,14	11,5	18,6
B30A2 - Eco2	9,87	12,68	2,81	15,1	18,6
BAP - Eco2	9,89	12,96	3,07	16,5	18,6
B30 - Oleo50	9,92	11,02	1,1	6,39	17,2
B30A1- Oleo50	9,88	11,52	1,64	9,53	17,2
B30A2 - Oleo50	9,91	11,7	1,79	10,4	17,2
BAP - Oleo50	9,87	11,76	1,89	10,98	17,2

Tableau IV-12 : Quantité de savon après 1 min.

On observe que la quantité de savon formée varie entre 1.25 et 2.18 g pour l'huile végétale (Eco2) en fonction du dosage en superplastifiant. La Figure IV-34 montre le rapport $\frac{M_s}{M_h} \times 100$ en fonction du dosage en superplastifiant.

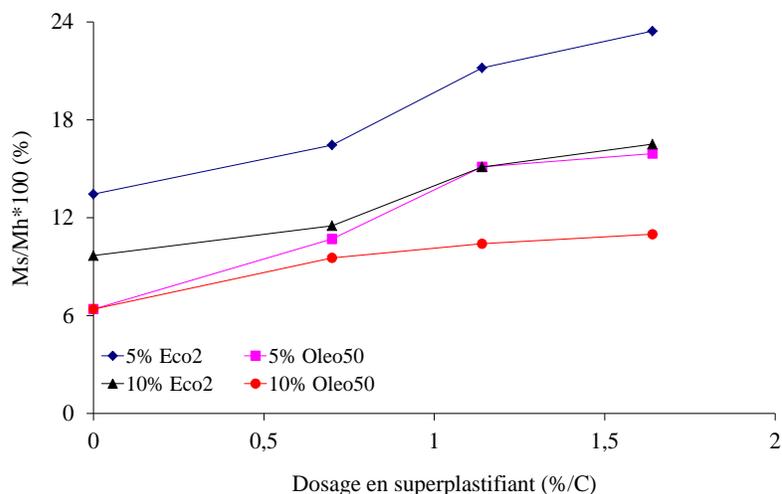


Figure IV-34 : Production de savon en fonction du dosage en superplastifiant.

Les résultats confirment les observations visuelles à savoir que l'augmentation du dosage en superplastifiant dans le béton provoque un accroissement de la masse de savon dans les milieux interstitiels avec une nette augmentation pour le béton autoplaçant (BAP).

L'huile végétale (Eco2) génère environ deux fois plus de savon que l'huile minérale (Oleo50). Cette différence peut être expliquée par le faible indice d'acide (1 mg KOH/g) de l'huile minérale (Oleo50). L'augmentation de la teneur en huile dans le milieu interstitiel est donc favorable à la formation de savon (Tableau IV-12).

Ce résultat n'apparaît pas avec les pourcentages calculés pour la Figure IV-34. En effet, ces pourcentages expriment une proportion d'huile transformée en savon. On note que cette proportion est plus faible pour une teneur de 10%. La nature de l'huile et sa teneur ont alors un effet sur la quantité de savon produite.

IV.9.3.2.1 Effet du temps sur la quantité de savon

Afin d'identifier l'influence du temps sur la quantité de savon produit, un suivi par pesée a été réalisé après 12 et 24h qui ont suivi l'agitation des milieux interstitiels. Les Tableaux IV-13 et IV-14 regroupent les résultats obtenus pour tous les milieux interstitiels à 12 et 24h.

Le suivi de la quantité de savon formé montre une légère augmentation jusqu'à 12 heures de repos. Entre 12 h et 24 h, la quantité de savon sur la paroi des flacons est restée quasi-stable. Ce résultat montre alors que la majeure partie du savon se forme avant les 12 heures, indépendamment de l'huile et du dosage en superplastifiant (SP).

	$M_{F,avant} (g)$	$M_{F,après} (g)$	$M_s (g)$	$\frac{M_s}{M_h} \times 100$	$M_h (g)$
5% d'huile					
B30 - Eco2	9,87	11,42	1,55	16,66	9,3
B30A1- Eco2	9,85	11,72	1,87	20,1	9,3
B30A2 - Eco2	9,9	12,18	2,28	24,51	9,3
BAP - Eco2	9,88	12,35	2,47	26,55	9,3
B30 - Oleo50	9,85	10,4	0,55	6,39	8,6
B30A1- Oleo50	9,86	10,98	1,12	13,02	8,6
B30A2 - Oleo50	9,85	11,22	1,37	15,93	8,6
BAP - Oleo50	9,89	11,33	1,44	16,74	8,6
10 d'huile					
B30 - Eco2	9,86	11,96	2,1	11,29	18,6
B30A1- Eco2	9,87	12,52	2,65	14,24	18,6
B30A2 - Eco2	9,87	12,99	3,12	16,77	18,6
BAP - Eco2	9,89	13,46	3,57	19,19	18,6
B30 - Oleo50	9,92	11,2	1,28	7,44	17,2
B30A1- Oleo50	9,88	11,61	1,73	10,05	17,2
B30A2 - Oleo50	9,91	11,79	1,88	10,93	17,2
BAP - Oleo50	9,87	11,86	1,99	11,56	17,2

Tableau IV-13 : Quantité de savon après 12h.

	$M_{F,avant} (g)$	$M_{F,après} (g)$	$M_s (g)$	$\frac{M_s}{M_h} \times 100$	$M_h (g)$
5% d'huile					
B30 - Eco2	9,87	11,48	1,61	17,31	9,3
B30A1- Eco2	9,85	11,71	1,86	20	9,3
B30A2 - Eco2	9,9	12,2	2,3	24,73	9,3
BAP - Eco2	9,88	12,34	2,46	26,45	9,3
B30 - Oleo50	9,85	10,41	0,56	6,51	8,6
B30A1- Oleo50	9,86	10,97	1,11	12,9	8,6
B30A2 - Oleo50	9,85	11,27	1,42	16,51	8,6
BAP - Oleo50	9,89	11,36	1,47	17,09	8,6
10 d'huile					
B30 - Eco2	9,86	11,94	2,08	11,18	18,6
B30A1- Eco2	9,87	12,53	2,66	14,3	18,6
B30A2 - Eco2	9,87	12,97	3,1	16,67	18,6
BAP - Eco2	9,89	13,48	3,59	19,3	18,6
B30 - Oleo50	9,92	11,22	1,3	7,55	17,2
B30A1- Oleo50	9,88	11,61	1,73	10,05	17,2
B30A2 - Oleo50	9,91	11,78	1,87	10,87	17,2
BAP - Oleo50	9,87	11,85	1,98	11,51	17,2

Tableau IV-14 : Quantité de savon après 24h.

Le béton est généralement décoffré 24 heures après sa mise en œuvre dans le coffrage, ce qui veut dire que ce délai est largement suffisant pour atteindre une quantité de savon maximale et donc assurer une bonne qualité de parement.

IV.9.4 Mesure du potentiel Zêta des milieux émulsionnés

Pour caractériser les milieux interstitiels, nous avons utilisé une technique très prisée pour l'étude de la stabilité des milieux organisés. En effet, la mesure du potentiel zêta est un paramètre extrêmement important dans un grand nombre de secteurs, notamment les céramiques, la pharmacie, la cosmétique, la médecine, le traitement des minéraux et des eaux ou l'agroalimentaire.

IV.9.4.1 Principe de la technique

Le potentiel zêta est en fait un potentiel électrocinétique caractérisant un système colloïdal. La valeur du potentiel zêta peut être reliée à la stabilité de la dispersion colloïdale. Ce potentiel indique le degré de répulsion ou d'attraction entre les particules de charges similaires. Pour les petites particules, un potentiel zêta élevé (positif ou négatif) signifie que la dispersion résiste au phénomène d'agrégation et donc qu'elle est stable. Quand le potentiel est faible, les forces d'attraction excèdent les forces répulsives et la dispersion tend vers une floculation.

Le potentiel zêta n'est pas mesurable directement mais il peut être calculé à l'aide de modèles théoriques et par la détermination expérimentale de la mobilité électrophorétique. Le principe de la mesure est basé sur la diffusion dynamique de la lumière (DLS), lumière émise par un laser. Par application d'un champ électrique, les particules chargées vont se déplacer d'une électrode à l'autre. Les particules dispersées dans la cellule diffusent la lumière lorsqu'elles passent devant le faisceau laser. Cette onde diffusée présente un décalage en fréquence (et phase) qui est fonction de la vitesse des particules. Ce décalage est mesuré par interférométrie.

Pour obtenir le potentiel Zêta, on utilise la loi de Henry qui relie ce dernier à la mobilité mesurée :

$$\xi = \frac{3 \times \mu \times \eta}{2 \times \epsilon \times f(ka)} \quad \text{IV-12}$$

Où :

ξ : le potentiel zêta en V,

ϵ : la constante diélectrique du milieu ($\epsilon = 78,5$ pour l'eau),

η : la viscosité en Pa.s,

$f(ka)$: la fonction de Henry, elle a une valeur qui est de 1 lorsque la force ionique est nulle et tend vers 1,5 lorsque les forces ioniques sont élevées. Par défaut le zêtasizer utilise une valeur de 1,5.

k : le paramètre de Debye en m^{-1} ,

a : le rayon de la particule en m.

μ : la mobilité électrophorétique.

Les deux phases ont souvent des affinités électrostatiques différentes ce qui provoque la formation d'une double couche électrique à l'interface, d'où la modélisation de l'émulsion par le modèle de la double couche de Gouy-Chapman [80]. On a l'habitude de considérer que la zone de stabilité d'une dispersion se situe entre un potentiel zêta compris entre ± 25 mV [81] [82]. La taille des particules dans un liquide est également mesurée jusqu'à moins d'un nanomètre, par diffusion dynamique de la lumière, en observant le mouvement thermique ou le mouvement brownien de la particule. En fonction de la taille de la particule, l'intensité et la dispersion de la lumière diffusée par les particules est différente, ce qui en détermine un coefficient de diffusion.

Dans le domaine des formulations, le potentiel zêta est utilisé pour sélectionner les systèmes les plus stables tout en réduisant le temps et le coût du développement. Il permet également une meilleure compréhension des mécanismes de stabilité pour contribuer à la qualité des produits.

IV.9.4.2 Dispositif expérimental et résultats

La mesure du potentiel zêta est réalisée à l'aide d'un Zétasizer Nano ZS de MALVERN Instruments (Figure IV-35). Cet appareil mesure également la taille des particules, le pH et la conductivité qui sont d'autres paramètres qui affectent la stabilité des émulsions.

La cellule de mesure est un capillaire en forme de U reliant deux électrodes qui est rempli par la solution dispersée est constituée par le milieu interstitiel contenant le savon. Le milieu est filtré avec une membrane en nitrate de cellulose d'une porosité inférieure à $10 \mu m$ (limite de détection de l'appareil) avant d'être introduit dans la cellule de mesure. Après stabilisation de la cuvette à $25^\circ C$, la mesure est lancée et répétée deux fois.



Figure IV-35 : Zétasizer Nano ZS.

Dans les Tableau IV-15 et IV-16 sont présentées les valeurs de potentiel zêta et de conductivité obtenues pour les milieux interstitiels.

Eco2		
Milieux interstitiels	PZ (mV)	Conductivité (mS/cm)
B30	-21,57	10,01
B30A1	-22,35	9,25
B30A2	-23,3	10,97
BAP	-27,55	12,25
Oleo50		
Milieux interstitiels	PZ (mV)	Conductivité (mS/cm)
B30	-14,35	11,6
B30A1	-15,55	10,7
B30A2	-15,63	12,03
BAP	-17,9	13,85

Tableau IV-15 : Potentiel zêta pour les milieux interstitiels à 5 % d'huile.

Eco2		
Milieux interstitiels	PZ (mV)	Conductivité (mS/cm)
B30	-26,83	9,105
B30A1	-27,05	7,725
B30A2	-30,2	9,23
BAP	-32,35	10,85
Oleo50		
Milieux interstitiels	PZ (mV)	Conductivité (mS/cm)
B30	-22,13	13,3
B30A1	-23,95	9,59
B30A2	-25,15	11,1
BAP	-28,35	13,3

Tableau IV-16 : Potentiel zêta pour les milieux interstitiels à 10 % d'huile.

Un potentiel zêta négatif indique tout d'abord une charge globale négative. Les résultats montrent que le potentiel zêta dépend directement de la nature de l'huile présente dans l'émulsion. Quelles que soient les concentrations en huile, le potentiel zêta est plus élevé (en valeur absolue) pour l'huile végétale (Eco2) que l'huile minérale (Oleo50). Ce résultat suggère **une meilleure stabilité des émulsions avec l'huile végétale (Eco2)** qu'avec l'huile minérale (Oleo50), quelle que soit la teneur en superplastifiant (SP).

Afin d'illustrer l'influence du dosage en superplastifiant (SP) sur le potentiel zêta, la Figure IV-36 présente l'évolution du potentiel zêta en fonction de la nature de la solution interstitielle (d'après les résultats des Tableau IV-15 et IV-16).

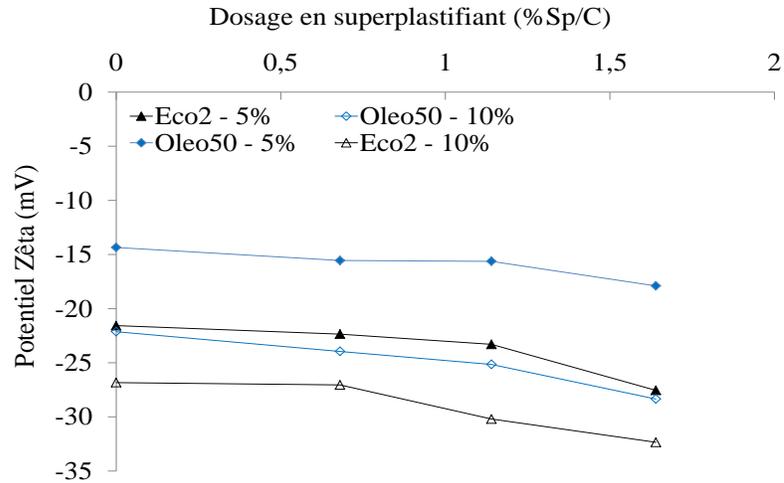


Figure IV-36 : Potentiel zêta en fonction du dosage en superplastifiant.

On observe que le potentiel zêta s'accroît (en valeur absolue) avec la teneur en superplastifiant (SP), ce qui indique que la teneur en superplastifiant favorise une organisation stable du milieu.

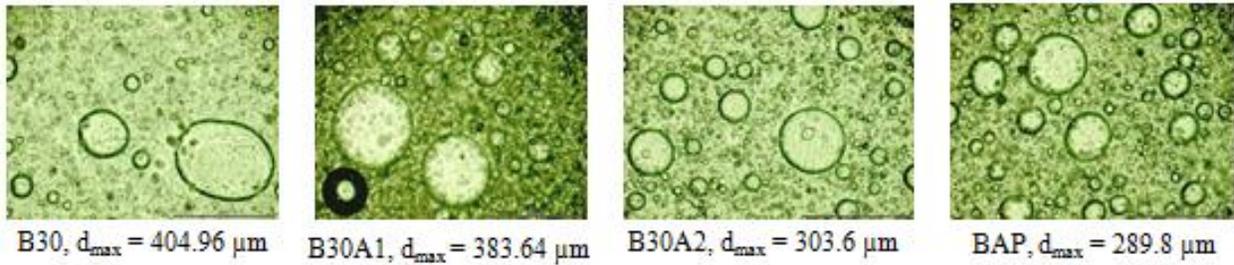
IV.10 Analyses des savons formés

IV.10.1 Observations microscopiques des savons

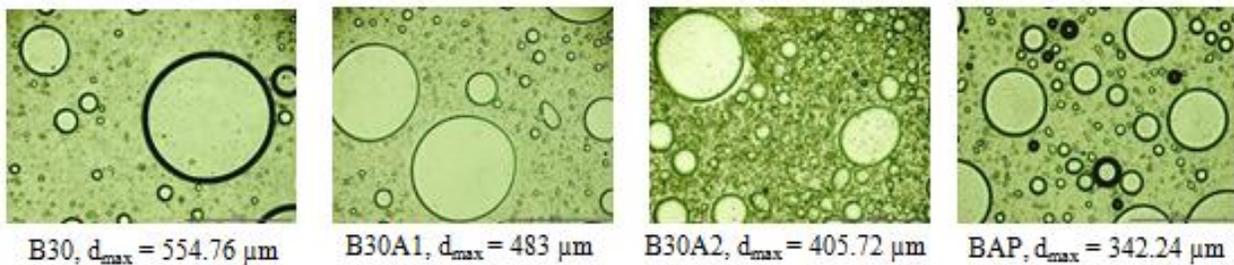
Les observations microscopiques ont été effectuées à l'aide d'un microscope de marque Nikon à épifluorescence (modèle Eclipse E600) équipé d'une caméra numérique (Olympus ; Color View II). L'acquisition a été réalisée au moyen du programme AnalySIS (version 5, Soft Imaging System, Olympus).

Les observations ont été réalisées sur les milieux interstitiels, en prélevant le savon déposé sur la paroi des flacons. L'échantillon a été ensuite étalé entre deux lamelles en verre. Les observations au microscope optique ont été faites sans lumière polarisée avec un agrandissement x10. Ces observations microscopiques ont pour but de comparer la structure des émulsions obtenues (Figure IV-37).

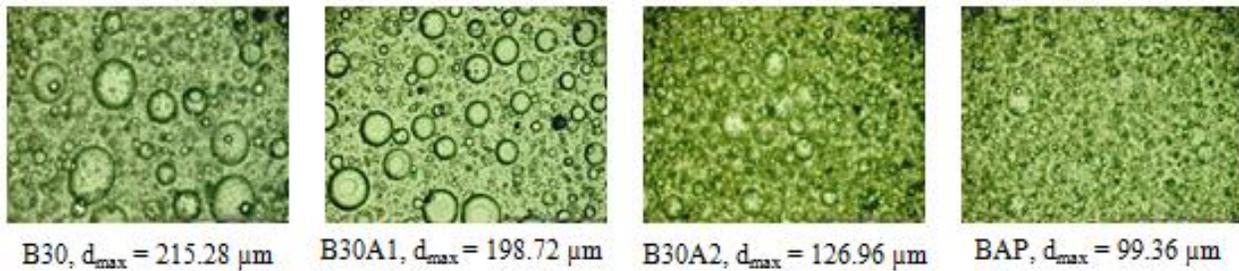
Solutions interstitielles + 5 % de l'huile végétale (Eco2)



Solutions interstitielles + 5 % de l'huile minérale (Oleo50)



Solutions interstitielles + 10 % de l'huile végétale (Eco2)



Solutions interstitielles + 10 % de l'huile minérale (Oleo50)

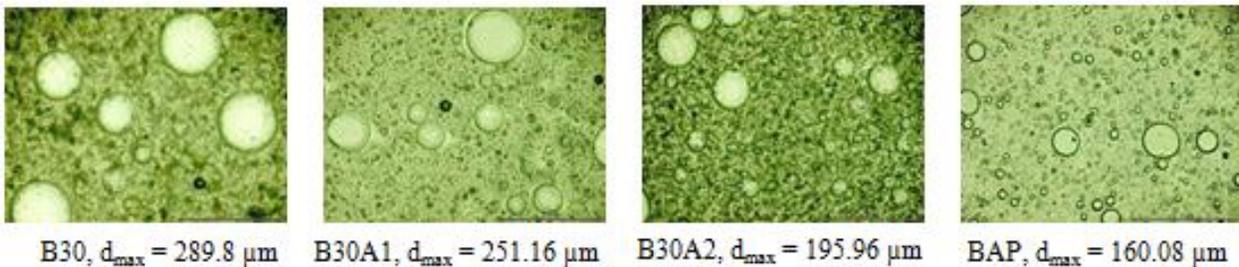


Figure IV-37 : Observations microscopiques

Les milieux élaborés avec l'huile végétale (Eco2) présentent des gouttelettes « Huile dans l'Eau » plus fines que dans le cas des émulsions préparées avec l'huile minérale (Oleo50). Ces derniers milieux comportent une population de gouttes avec des tailles plus élevées créant une hétérogénéité plus importante. De plus, un phénomène de coalescence important est observé dans

le cas des milieux interstitiels formés par l'huile minérale (Oleo50) notamment à faible concentration en huile.

Les milieux à 10% d'huile présentent une meilleure dispersion et homogénéité des gouttelettes que pour une concentration de 5%. Une teneur élevée en superplastifiant (SP) favorise la formation de fines gouttelettes pour les deux huiles. Ce phénomène est observé pour les concentrations en huile de 10 % quelle que soit la nature de l'huile. Les milieux avec B30A2 et BAP associés à l'huile végétale (Eco2) présentent donc l'organisation la plus homogène avec les gouttes les plus petites.

IV.10.2 Analyse infrarouge par spectrométrie des savons

La spectroscopie infrarouge (IR) permet d'identifier la structure chimique des savons formés dans les milieux interstitiels. Des spectres ont été effectués à l'aide d'un spectromètre FT-IR SPECTRUM 65 de la société allemande PerkinElmer LAS. Cet appareil permet d'analyser des échantillons liquides ou solides.

IV.10.2.1 Protocole

Pour chaque analyse, une pastille de KBr (bromure de potassium anhydre) est préparée à l'aide d'une presse hydraulique. Un échantillon de savon est prélevé sur la paroi des flacons et est déposé sur la pastille. La pastille est positionnée sur un support adapté pour réaliser le spectre infrarouge (IR).

IV.10.2.2 Résultats

Les spectres comportent tous la vibration caractéristique d'un sel d'acide carboxylique à 1745 cm^{-1} (vibration C=O d'un ester carboxylate).

La comparaison des spectres (IR) montre que les savons formés sont de même nature et donc ne dépendent pas de la présence du superplastifiant. Ce résultat confirme que le SP, sous sa forme d'ions carboxylates ou non, est un tensio-actif soluble dans l'eau. Par contre, les résultats mettent logiquement en évidence que la nature du savon formé dépend de la nature d'huile présente dans le milieu interstitiel.

Dans le cas de la formulation végétale, le savon en quantité majoritaire comporte la chaîne hydrocarbonée d'un ester mono-insaturé (oléate) ou di-insaturé (linoléate), d'après les vibrations de la liaison C=C observées dans la zone $3000\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$. Dans le cas de la formulation minérale, il s'agit d'une chaîne hydrocarbonée saturée. Les corrélations avec la banque de spectre sont respectivement de 0.91 et 0.96.

Ce résultat confirme donc que le savon formé provient de matières premières différentes selon que les milieux impliquent l'ester végétal ou l'huile minérale.

IV.11 Interprétation des résultats et du mode d'action

Le Tableau IV-17 rassemble les effets observés. L'influence de la teneur en huile peut être attribuée à une meilleure perception des phénomènes pour une concentration en huile plus élevée.

Paramètres	Mesure	Comparaison entre les deux huiles	Teneur en huile	Teneur en SP
Quantité d'émulsion dans le milieu interstitiel	Comparaison visuelle	+ Aspect laiteux plus prononcé avec Oleo 50	+ avec 10%	+
Stabilité de l'émulsion	Comparaison visuelle (Milieu Interstitiel)	O	O	+
Stabilité du milieu émulsionné (avec savons)	Zétasizer	+ Avec Eco2	+	+
Quantité de savon	Comparaison visuelle et par pesée	+ Avec Eco2	+ avec 10%	+
Qualité du savon (dispersion huile dans eau)	Microscopie	+ avec Eco2	+ avec 10%	+

Tableau IV-17 : Résumé des effets observés au cours de cette étude.

+ : Effet amplifié par le facteur étudié.

O : Pas d'effet observé.

Le phénomène de coalescence observé pour les émulsions à base d'huile minérale confère à ces milieux une stabilité plus limitée que pour les milieux contenant l'ester végétal. Par contre, ces mêmes milieux présentent une quantité d'émulsion importante provenant d'une dispersion accrue de l'huile minérale dans le milieu. Ce processus est à l'origine de la solubilisation partielle du film observée par L. Libessart [1], d'où une réduction du film se traduisant par une altération de l'effet barrière.

Les milieux interstitiels à base d'esters végétaux produisent logiquement davantage de savons, puisque ces mêmes esters constituent la matière première source des carboxylates de calcium.

Cette formation des savons accrue explique ainsi la meilleure stabilité des émulsions mais également la réduction du film lubrifiant observée. Mais, grâce à la présence des sels d'acide gras, l'interface se structure en couches moléculaires, notamment sous l'effet du cisaillement mécanique. Il en résulte le maintien des performances lubrifiantes élevées.

IV.12 Conclusion

Les deux huiles de démoulage retenues pour cette étude ont un comportement rhéologique de type newtonien. La quantité d'eau collectée à l'interface béton/coffrage dépend de la formulation du béton et la pression de contact. L'augmentation de la teneur en fines dans un béton conduit une diminution de la quantité d'eau libre à l'interface. Le pH de ces solutions

interstitielles collectées est basique quels que soient le volume de pâte et le dosage en superplastifiant.

Les résultats obtenus pour les milieux interstitiels formulés avec des teneurs en huile supérieures à 10%, montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant abaisse la tension interfaciale entre le milieu et la paroi et génère une augmentation de la viscosité apparente.

Pour les milieux interstitiels, la quantité de savon formé par les milieux interstitiels reconstitués dépend de trois paramètres ; le dosage en superplastifiant, la nature de l'huile et le pourcentage d'huile. Les analyses sur les milieux fournissent des résultats cohérents et permettent d'établir les constatations suivantes :

- la formation d'un milieu émulsionné stable est favorisée par une teneur en superplastifiant élevée, avec une teneur à 10% en huile.
- la formation de savon est favorisée en présence de l'huile végétale (Eco2), d'un dosage élevé en superplastifiant et en huile.

La mesure du potentiel zêta apporte la précision suivante : les émulsions à base de l'huile végétale (Eco2), présentent systématiquement une stabilité supérieure par rapport à celles reconstituées avec l'huile minérale (Oleo50). Dans tous les cas, la stabilité des émulsions est renforcée par la présence du superplastifiant.

Le superplastifiant abaisse les tensions interfaciales liquide/liquide ou liquide/paroi, et de ce fait favorise les échanges entre le film d'huile et la solution interstitielle. De plus, le superplastifiant rapproche les performances de l'huile minérale de celles de la formulation végétale en matière de réduction de frottement. Quelle que soit la nature de l'huile, le superplastifiant est favorable à la réduction de frottements en contribuant à la formation d'une phase tampon émulsionnée.

Les milieux réalisés à partir de l'huile minérale (Oleo50) génèrent une quantité d'émulsion importante (aspect laiteux), présentant, cependant, une moins bonne stabilité que les émulsions produites par l'huile végétale (Eco2) (résultats repris dans le Tableau IV-17).

De plus, le milieu avec l'huile végétale (Eco2) génère davantage de savon qu'avec l'huile minérale (Oleo50). Ce savon forme avec l'huile une émulsion épaisse de bonne qualité qui se dépose sur la paroi et qui présente une organisation homogène de fines gouttelettes en microscopie.

Ces observations apportent ainsi des précisions aux modèles suggérés dans la thèse L. Libessart [1] pour expliquer les niveaux de contraintes de frottement. Dans tous les cas, la formation de micelles huile/eau stabilisées par un savon se fait au détriment du film d'huile. Mais, consécutif à ce phénomène, les interfaces s'organisent par le biais de deux processus différents selon la nature de l'huile.

Dans le cas du film d'huile minérale, le savon émulsionne le film d'hydrocarbures conduisant à sa solubilisation partielle se traduisant par une perte de performances en matière de lubrification

interfaciale. Ces performances sont compensées grâce à la présence d'un agent de surface, non détergent qui favorise la formation d'une émulsion interfaciale huile /savon stable. C'est le rôle joué par le superplastifiant.

L'épaisseur du film d'huile n'est donc pas le seul facteur qui gouverne les contraintes de frottement. L'existence d'une phase tampon émulsionnée grâce à la réduction des tensions interfaciales est un autre paramètre clé.

Dans le cas du film d'huile végétale, la formation plus abondante de savons issus des esters et des acides gras, joue un rôle primordial en organisant le milieu interstitiel, en le stabilisant et en contribuant à l'hydrophobation de la paroi.

L'utilisation d'un superplastifiant pour la formulation végétale ne se justifie pas nécessairement, si on ne considère que les performances de lubrification. Mais, les propriétés tensio-actives du superplastifiant sont susceptibles d'intervenir également sur la qualité du parement en réduisant le bullage.

Chapitre V:

**Influence de la formulation du béton sur le
comportement tribologique aux interfaces
béton/coffrage et béton/huile/coffrage**

V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude du frottement des bétons frais avec et sans huile de démoulage. Les essais de frottement ont été effectués à l'aide d'un tribomètre plan/plan. Les caractéristiques de la plaque métallique du tribomètre et les conditions expérimentales sont présentées en premier lieu. Ensuite, une étude tribologique sans huiles de démoulage a été réalisée sur les neuf compositions de bétons présentées précédemment dans le chapitre II. Cette étude porte sur l'analyse de l'influence du volume de pâte et du dosage en superplastifiant sur l'évolution des contraintes de frottement à l'interface béton/coffrage.

A la fin de ce chapitre, une étude de l'interface béton/huile/coffrage a été effectuée. Pour les deux huiles, une huile végétale et une huile minérale, le comportement du film d'huile à l'interface a été analysé en fonction de la composition du béton et de la nature de l'huile de démoulage.

V.2 Caractéristique de la plaque métallique

Pour cette campagne expérimentale, les paramètres d'étude ont été choisis en fonction des conditions du chantier. Dans le domaine du bâtiment et des travaux publics, la vitesse de bétonnage constitue un paramètre important lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages. Elle doit être adaptée en fonction de la hauteur des coffrages et de la consistance du béton à l'état frais [83] [84]. Dans cette étude, la vitesse de remplissage du coffrage a été simulée par la vitesse de glissement de plaque métallique du tribomètre. Elle est fixée à 6 h/m (1.67 mm/s). Pour vérifier la répétabilité des mesures, trois essais ont été effectués pour chaque pression.

Pour les essais, la plaque du tribomètre a été prélevée dans la paroi de coffrage afin de reproduire les conditions de chantier. Ses dimensions sont données dans la Figure V-1-a. Sa rugosité a été contrôlée à l'aide d'un rugosimètre portable avec afficheur graphique à cristaux liquide (*TR-200-TIME*) (Figure V-1-b). Cet appareil permet de déterminer les paramètres suivants : R_a , R_q (0.01 à 40 μm) et R_z , R_y , R_p , R_t (0.02...160 μm). Ce sont les deux paramètres R_a et R_t qui vont être mesurés dans cette étude afin d'évaluer la capacité des particules fines à s'incruster dans la rugosité de la plaque métallique.

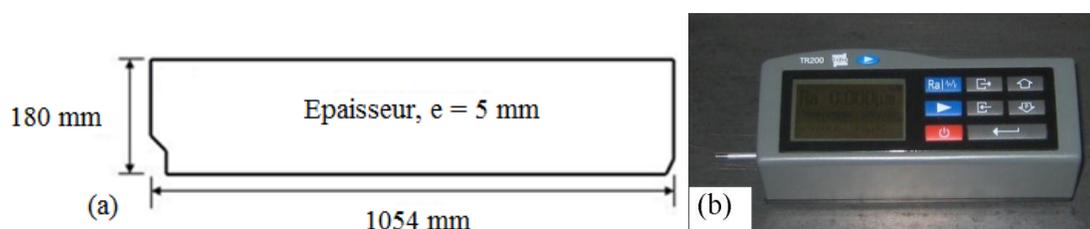


Figure V-1 : (a) schéma détaillé de la plaque métallique (dimensions en mm) et (b) Rugosimètre portable.

La Figure V-2 présente les paramètres disponibles qui permettent l'évaluation de la rugosité :

- R_a : la moyenne arithmétique des écarts du profil par rapport à la ligne moyenne,
- R_v : la profondeur du creux le plus bas sur une longueur d'évaluation,
- R_p : la profondeur moyenne sur une longueur d'évaluation,
- R_t : la hauteur du pic à vallée maximale du profil,
- R_q : la valeur moyenne quadratique des écarts du profil.

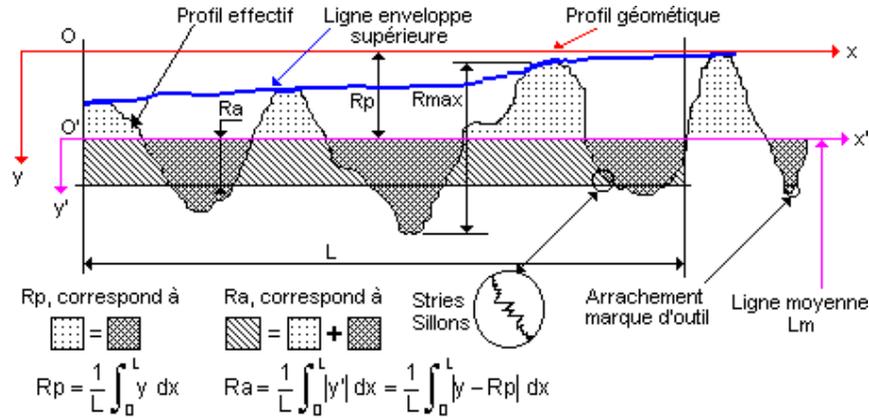


Figure V-2 : Schéma explicatif des paramètres de rugosité [1].

La moyenne arithmétique des écarts du profil par rapport à la ligne moyenne (R_a) est le paramètre international le plus utilisé pour définir la rugosité. La connaissance de la hauteur du pic à vallée maximale du profil (R_t) permet d'évaluer la capacité des grains à se loger dans la rugosité de la plaque métallique lors du processus de frottement. Il est important de rappeler que 80% des grains de ciment et 63% de grains de filler sont inférieurs à cette valeur de 20 μm .

Plusieurs mesures ont été effectuées sur les deux côtés de la plaque afin de déterminer la rugosité moyenne. Les résultats obtenus montrent que la hauteur du pic à vallée maximale du profil (R_t) est comprise entre 4 et 19 μm . La moyenne arithmétique des écarts du profil par rapport à la ligne moyenne (R_a) est comprise entre 0.7 et 1.7 μm .

V.3 Influence de la pression de contact sur les frottements

La Figure V-3 présente l'enregistrement de la force tangentielle en fonction du temps pour différentes pressions de contact. Les résultats montrent que l'allure des courbes est similaire quelle que soit la pression.

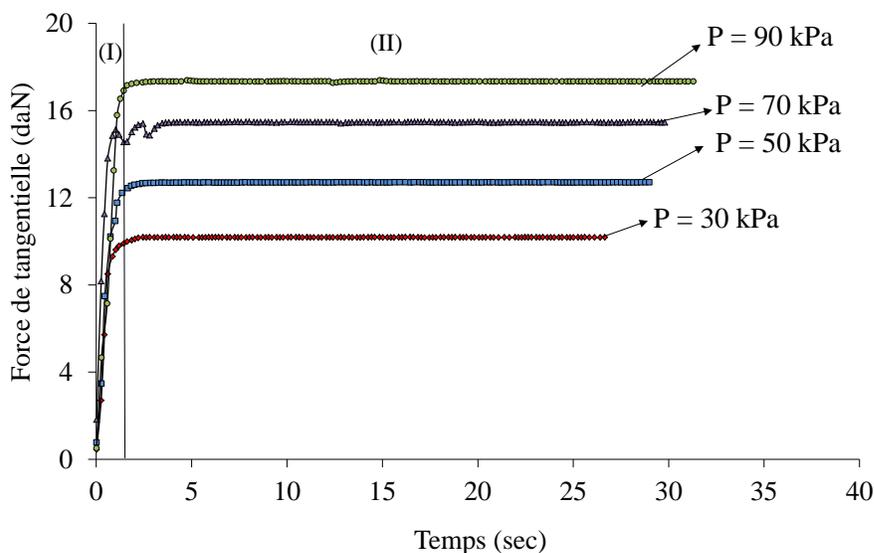


Figure V-3 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction du temps pour un volume de pâte de 28%

Ces courbes peuvent être décomposées en deux zones [10].

- la zone I : présente une croissance de la contrainte de frottement due au temps de démarrage du moteur, au rattrapage des jeux et la réponse élastique de la chaîne mécanique.
- la zone II : traduit un régime stationnaire. Le frottement est sensiblement constant durant l'essai. Les contraintes de frottement statique et dynamique sont identiques pour cette interface béton/coffrage. Ce seront ces valeurs de frottement qui seront prises en compte.

La Figure V-4 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact. Chaque point de cette courbe représente une moyenne de cinq points sur le régime dynamique (zone II) de la Figure V-3.

L'évolution de la courbe est linéaire et suit une loi de frottement de type Coulomb dans la gamme des pressions étudiées. Les résultats montrent que la contrainte de frottement croît lorsque la pression de contact augmente.

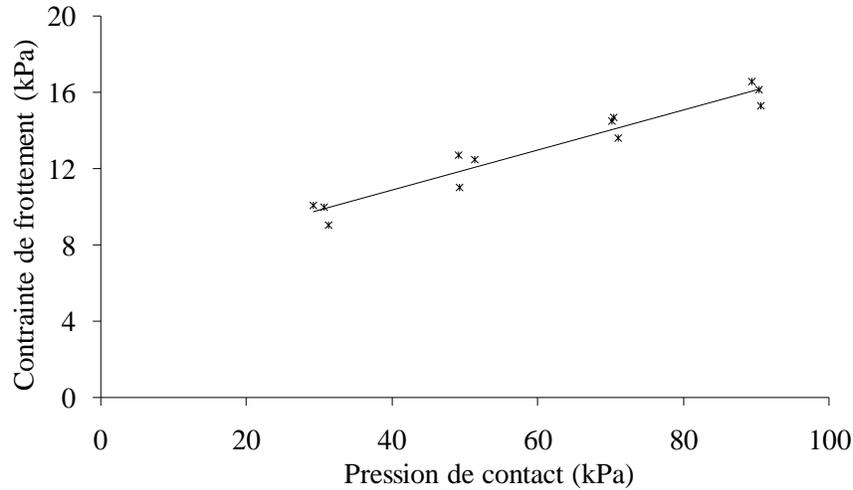


Figure V-4 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour le béton B28 – effet de la pression de contact.

La contrainte normale appliquée au béton se transmet à la phase granulaire (ciment, filler calcaire, sable et gravillon) et à l'eau. Cette pression provoque une migration d'une partie de la phase liquide et des fines près de la paroi vers la plaque métallique pour combler les vides laissés par les granulats de taille élevée. Cette migration de la pâte s'effectue à travers le réseau de granulats, conduisant les éléments fins à s'empiler les uns sur les autres pour former une couche à l'interface. Cette couche appelée « couche limite » est composée d'eau et de particules fines de diamètre inférieur à 80 μm (Figure V-5). Ces résultats ont été observés lors de l'étude de la couche d'interface dans le chapitre III.

A noter que le phénomène de l'effet de paroi peut également être à l'origine de la formation d'une interface béton/coffrage riche en particules fines et en eau par rapport au reste du mélange (Chapitre III). Dans le cas du béton frais, les particules les plus fines sont poussées par les autres près de la surface pour remplir les vides laissés entre les plus gros. Ce phénomène est appelé « effet de paroi ».

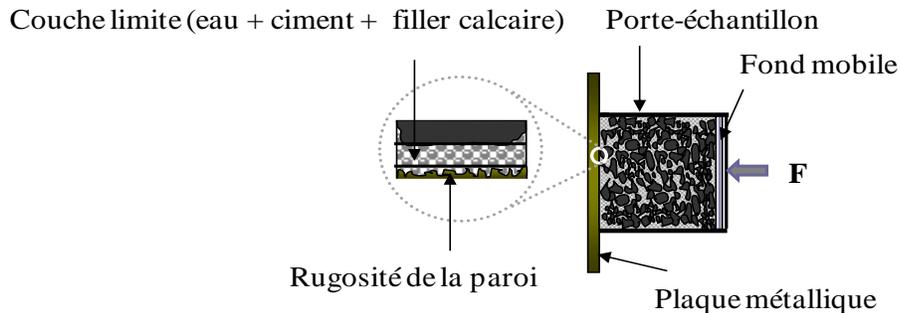


Figure V-5 : Formation de la couche limite.

Une augmentation de la contrainte de frottement est observée lorsque la pression de contact croît. La contrainte normale appliquée au matériau se transmet à la couche limite par une chaîne de force. Ce phénomène implique des contacts grain-grain qui jouent un rôle majeur dans la distribution des contraintes à l'interface et l'augmentation des frottements intergranulaire [85] [86].

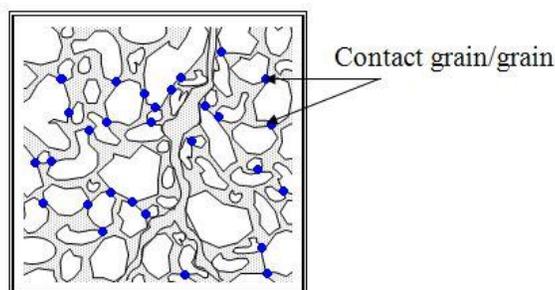


Figure V-6 : Représentation schématique du contact grains - grains dans le béton.

Quand la pression augmente, l'intensité du contact devient plus importante entre les grains constituant le mélange. La plaque métallique possède une rugosité qui peut atteindre jusqu'à $R_t = 19\mu m$, ce qui permet le piégeage des éléments fins (ciment, filler) dans ses aspérités. Les grains piégés dans rugosité de la plaque ne peuvent pas se mouvoir, ils ont tendance à entraîner d'autres grains proches de la paroi.

Au voisinage de la paroi, une augmentation de la quantité de fines est observée lors la pression de contact augmente (Chapitre III). Ce phénomène crée également une adhérence mécanique entre la couche mince et la plaque métallique. Cette adhérence augmente avec la pression de contact. Le milieu devient donc, plus rigide à l'interface, ce qui nécessite une force de cisaillement plus importante pour créer un mouvement au voisinage de la paroi. Une telle configuration engendre une augmentation des contraintes de frottement à l'interface béton/paroi.

Dans un tel cas, lors du déplacement de la plaque, le frottement entre particules agit en tant que force de résistance aux déplacements. En effet, le réseau formé par les particules fines à l'interface doit être brisé pour permettre le déplacement de plaque. Donc, Il est important de noter que le matériau subit un cisaillement interne à proximité de la paroi (Figure V-7).

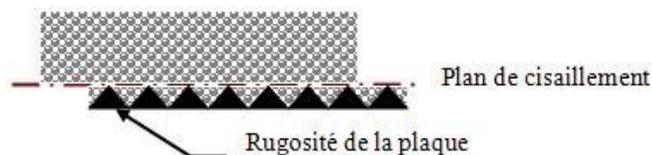


Figure V-7 : Plan de cisaillement de la couche limite.

Des résultats similaires ont été trouvés par Vanhove [10]. Il a montré que la contrainte de frottement évolue linéairement pour une pression inférieure à 110 kPa. Dans ce cas, le cisaillement se fait principalement dans la couche limite.

V.4 Effet du volume de pâte

Dans le domaine du pompage, la pâte joue un rôle de lubrifiant en limitant les forces de frottement intergranulaires et améliore la pompabilité du béton en réduisant les frottements béton/tuyaux grâce à une couche limite lubrifiante [43] [14]. La question qui reste posée est :

Le volume de pâte va-t-il jouer un rôle similaire à l'interface béton/coffrage ?

Pour répondre à cette question, des essais de frottement ont été réalisés sur quatre bétons ordinaires possédant différents volumes de pâte. La Figure V-8 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression pour les bétons B28, B30, B32 et B34. Les résultats obtenus montrent que la contrainte de frottement augmente quand le volume de pâte augmente.

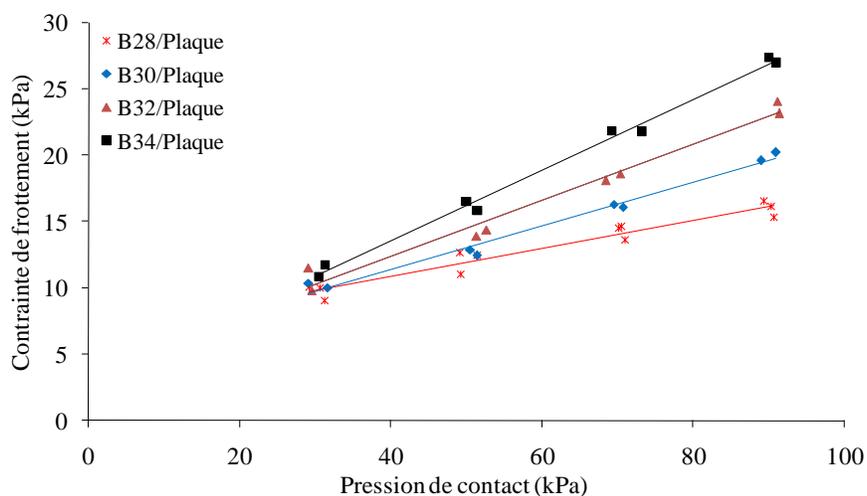


Figure V-8 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact – effet du volume de pâte.

Les grains de ciment en contact avec l'eau ont tendance à s'agglomérer sous forme d'amas (flocs) avec une structure en château de cartes (Figure V-9). Ce phénomène est lié à la présence de charges électriques sur la surface des grains et en l'absence de réducteur d'eau, ils tendent à piéger un certain volume d'eau à l'intérieur des amas de grains [87]. Cette eau emprisonnée, se déplace avec l'agglomérat comme si elle était solide [88].

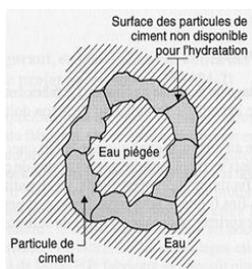


Figure V-9 : Agglomération des grains de ciment [87].

Les résultats présentés au chapitre III montrent que la quantité de fines à l'approche de la paroi coffrante est plus importante pour les bétons à volume de pâte élevé quelle que soit la pression de contact. En effet, quand le pourcentage de pâte augmente, le nombre de floccs devient plus élevé dans le béton ce qui entraîne un encombrement dans la couche limite. Sous l'effet de la pression de contact, ces agglomérats ont plus de difficulté à se mouvoir, la couche limite devient plus rigide, ce qui induit une augmentation plus importante de la contrainte de frottement. (Figure V-10).

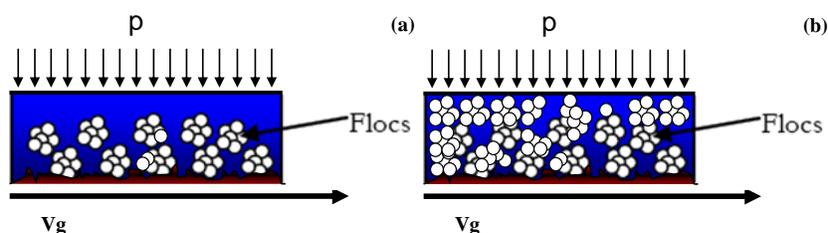


Figure V-10 : Représentation schématique de l'interface : (a) volume de pâte faible, (b) volume de pâte élevé.

Des résultats similaires ont été trouvés dans une étude effectuée par Neville sur le frottement du béton frais contre une plaque métallique [48]. L'augmentation des frottements peut se produire dans le cas des mélanges possédant une teneur en fines élevée. Dans cette situation, le frottement solide entre les grains du squelette granulaire augmente par contacts directs et entraîne un blocage dans la couche limite.

Pour conclure, le volume de pâte à l'interface béton/coffrage ne joue pas le rôle de lubrifiant. Le plan de cisaillement se produit entre la couche limite et la paroi coffrante. Par contre, dans le cas du pompage, le glissement s'effectue entre le béton et la couche limite. De plus, La configuration des appareils utilisés permet de déterminer les paramètres rhéologiques de l'interface (seuil et viscosité d'interface) pour prédire la pompabilité des bétons.

V.4.1.1 Effet du dosage en superplastifiant

La Figure V-11 illustre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les six bétons formulés. Ces courbes mettent en évidence l'influence du dosage en superplastifiant dans un béton à volume de pâte constant.

Les résultats montrent que la contrainte de frottement diminue lorsque le dosage en superplastifiant augmente quel que soit le volume de pâte. L'ajout du superplastifiant dans un béton, disperse les grains de ciment par l'effet stérique et répulsion électrostatique. Les molécules du superplastifiant s'adsorbent à la surface des particules du ciment leur conférant des charges électrostatiques négatives. De cette façon, les particules de ciment se repoussent et sont défloculées.

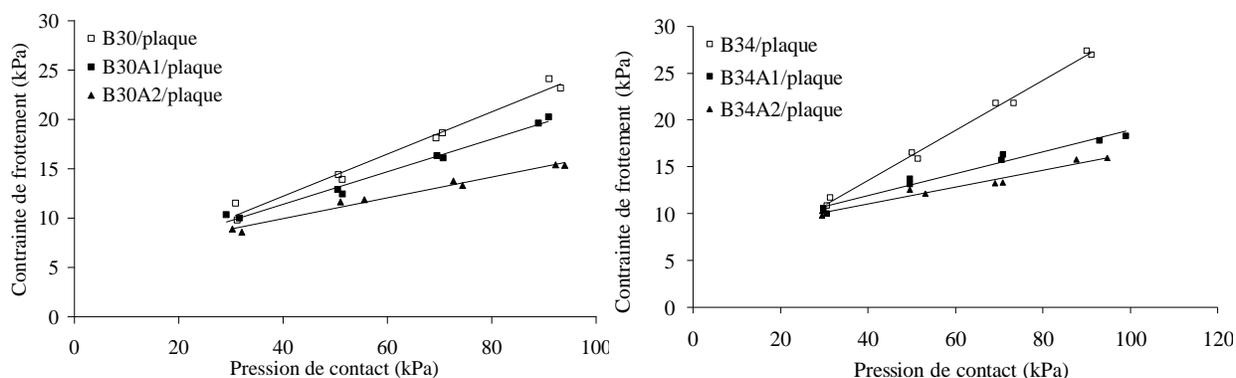


Figure V-11 : Evolution de la contrainte de frottement fonction de la pression de contact pour les bétons à 30 et 34% de pâte – effet du dosage en superplastifiant.

Le pouvoir dispersant sur les grains de ciment s'accroît lorsque le superplastifiant est en quantité suffisante dans le béton. Ce phénomène améliore la fluidité et augmente le taux de déformation du béton en réduisant les frottements intergranulaires. A l'interface, la couche limite devient donc moins rigide. La mobilité des grains de ciment et du filler est plus aisée et permet ainsi une déformation plus facile du milieu sous cisaillement. Ce qui entraîne une diminution des contraintes de frottement à l'interface béton/paroi.

La Figure V-12 présente une comparaison entre les bétons adjuvantés et le BAP. Pour un faible dosage en superplastifiant, les résultats obtenus montrent que le volume de pâte est le seul paramètre gouvernant les frottements à l'interface béton/paroi. Ces observations sont valables uniquement pour les bétons B30A1 et B34A1 (E/L constant).

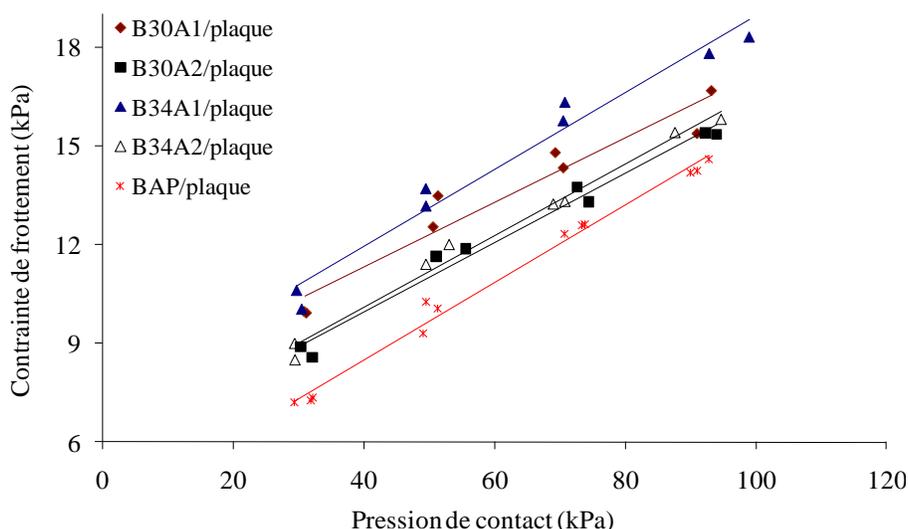


Figure V-12 : Evolution de la contrainte de frottement fonction de la pression de contact pour les bétons adjuvantés et le béton autoplaçant.

Pour les bétons B30A2 et B34A2, l'évolution de la contrainte de frottement est similaire. Par ailleurs, le béton autoplaçant (BAP) possède des contraintes de frottements plus faibles par

rapport aux autres bétons. La présence du superplastifiant permet donc de réduire les frottements jusqu'à une valeur seuil au-delà de laquelle le volume de pâte n'influence plus la variation des contraintes de frottement (B30A2 et B34 A2).

Afin de mieux comprendre le phénomène, la Figure V-13 met en évidence l'impact du superplastifiant sur les contraintes de frottement à une pression de 90 kPa pour les bétons à 30% et 34% de pâte.

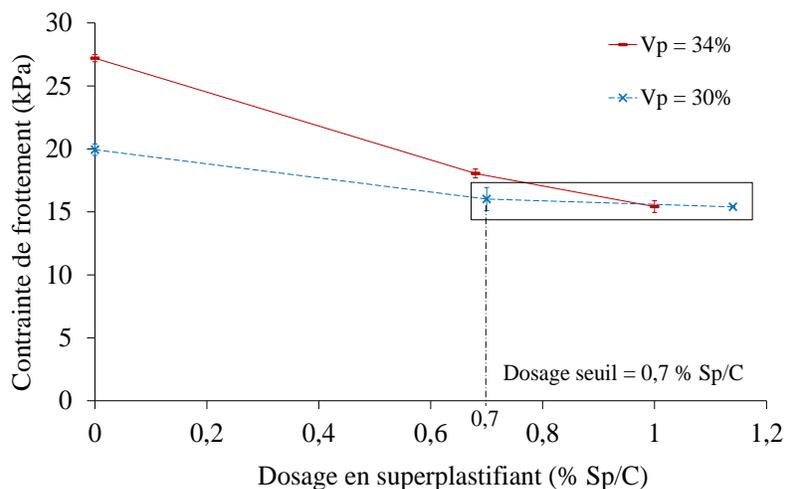


Figure V-13 : Evolution des contraintes de frottement en fonction du dosage en superplastifiant.

L'influence du volume de pâte est moins prononcée avec la présence du superplastifiant. Un dosage seuil autour de 0,7% est constaté pour lequel la contrainte de frottement devient identique quel que soit le volume de pâte. Les autres courbes ont la même allure quelle que soit la pression de contact.

V.4.1.2 Pulvérisation du superplastifiant sur la paroi

Afin de mieux comprendre le rôle du superplastifiant à l'interface béton/coffrage pour des bétons à volume de pâte et dosage en superplastifiant différents, le superplastifiant a été appliqué sur la plaque métallique par pulvérisation au moyen d'un pulvérisateur de type Ecospray. L'épaisseur du film a été précédemment déterminée par la méthode de pesée. Elle est de 8 μm environ et de 4 μm après le passage du système d'étanchéité.

La Figure V-14 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour des bétons dosés à 30% de pâte. Cette figure montre une comparaison entre les différentes interfaces ; béton ordinaire/SP/plaque, béton adjuvanté/plaque et béton adjuvanté/SP/plaque.

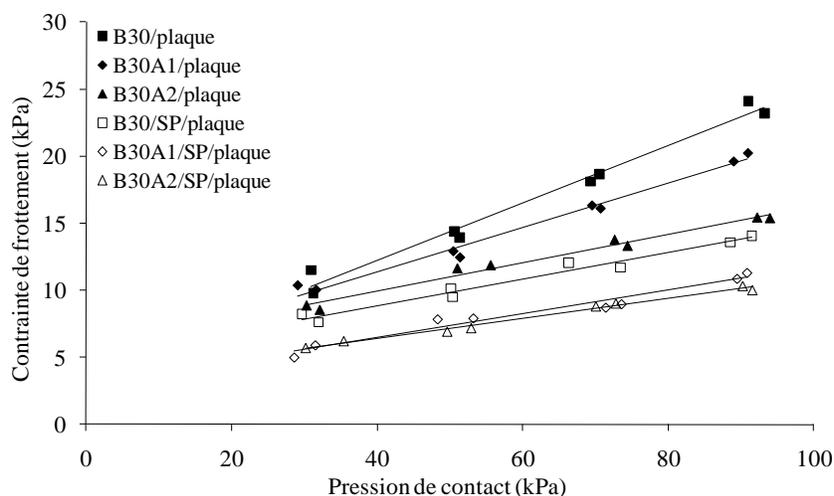


Figure V-14 : Evolution de la contrainte de frottement pour les bétons à 30% de pâte.

Les résultats obtenus montrent que la présence du superplastifiant sur la plaque métallique est plus efficace pour réduire les frottements à l'interface. L'évolution des contraintes de frottement pour les deux interfaces B30A1/SP/plaque et B30A2/SP/plaque est identique. Ce phénomène peut être expliqué par la saturation de la couche limite en superplastifiant (les grains de ciment sont complètement défloculés dans le milieu) pour ces deux bétons adjuvantés.

La Figure V-15 illustre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les bétons dosés à 34% de pâte. Dans le cas présent, l'augmentation du dosage en superplastifiant n'affecte plus l'évolution des contraintes de frottement pour les interfaces béton/SP/plaque. La couche limite est donc saturée en superplastifiant pour les trois bétons (B34, B34A1 et B34A2).

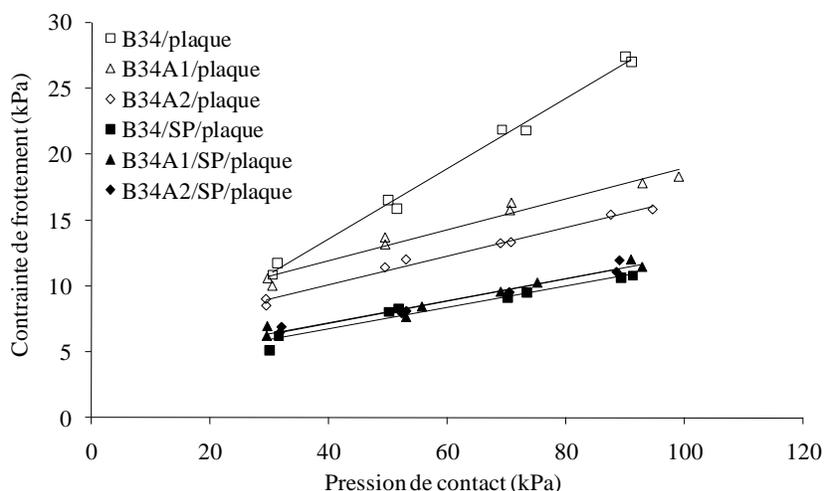


Figure V-15 : Evolution de la contrainte de frottement pour les bétons à 34% de pâte

Par ailleurs, ce phénomène a été observé à partir d'un dosage de 0,7% en superplastifiant pour les bétons à 30% de pâte. Il est important de noter que la teneur en fines de la couche limite

augmente lorsque le volume de pâte est élevé et le rapport E/L est faible. La couche limite du béton B30 contient donc moins de ciment par rapport aux autres bétons étudiés. Ce phénomène provoque un contact direct entre les grains solide (sable, granulats) et la plaque métallique ce qui favorise l'augmentation des contraintes de frottement à l'interface B30/SP/plaque.

Afin de mieux apprécier l'effet du superplastifiant sur la réduction des contraintes de frottement aux interfaces béton/plaque et béton/SP/plaque, le Tableau V-1 récapitule les valeurs des contraintes de frottement ainsi que leur taux de réduction.

Pour les bétons à 30% de pâte, le pourcentage de réduction des contraintes de frottement a été calculé pour rapport au béton B30. Il en est de même pour les bétons à 34% de pâte. Un accroissement du taux de réduction des contraintes de frottement est constaté pour les dosages élevés en superplastifiant. Elle varie entre 2 à 23% pour 30 kPa et de 19 à 23% pour 90 kPa en fonction du dosage en pâte et en superplastifiant dans le béton.

De plus, la pulvérisation du superplastifiant sur plaque métallique permet de générer une baisse de la contrainte de frottement de 22 à 60% en fonction de la pression de contact. Cette diminution est plus prononcée pour les bétons adjuvés. Elle peut atteindre 41% à 30 kPa et 69% à 90 kPa.

		Pression (kPa)			
		30	50	70	90
B30/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	10,18	12,67	16,21	19,93
B30A1/Plaque	Taux de réduction (%)	2,26	5,21	10,21	19,64
	Contraintes de frottement (kPa)	9,95	12,01	14,56	6,02
B30A2/Plaque	Taux de réduction (%)	22,74	27,33	38,03	43,47
	Contraintes de frottement (kPa)	8,73	11,75	13,52	15,37
B30/SP/Plaque	Taux de réduction (%)	22,15	22,45	26,77	30,67
	Contraintes de frottement (kPa)	7,925	9,825	11,875	13,82
B30A1/SP/Plaque	Taux de réduction (%)	46,41	37,77	45,42	44,37
	Contraintes de frottement (kPa)	5,45	7,88	8,85	11,09
B30A2/SP/Plaque	Taux de réduction (%)	41,50	44,36	45,05	49,01
	Contraintes de frottement (kPa)	5,95	7,05	8,91	10,16
B34/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	11,3	16,17	21,82	27,2
B34A1/Plaque	Taux de réduction (%)	8,63	16,94	26,51	33,64
	Contraintes de frottement (kPa)	10,32	13,43	16,04	18,05
B34A2/Plaque	Taux de réduction (%)	23	26,8	39,19	41,78
	Contraintes de frottement (kPa)	8,7	11,84	13,27	15,83
B34/SP/Plaque	Taux de réduction (%)	44,45	35,64	42,61	46,33
	Contraintes de frottement (kPa)	5,65	8,15	9,305	10,7
B34A1/SP/Plaque	Taux de réduction (%)	28,85	61,67	57,71	69,01
	Contraintes de frottement (kPa)	7,12	8,83	10,905	12,38
B34A2/SP/Plaque	Taux de réduction (%)	41,06	50,60	56,47	57,72
	Contraintes de frottement (kPa)	6,66	7,99	9,5	11,5

Tableau V-1 : Récapitulatif du taux de réduction des contraintes de frottement – effet du superplastifiant.

V.5 Etude des frottements béton/huile/coffrage

L'huile de démoulage a été appliquée sur la plaque métallique par pulvérisation à l'aide d'un pulvérisateur de type Ecospray. La mesure de la contrainte de frottement a été effectuée à l'aide d'un tribomètre plan/plan, afin de comprendre les mécanismes intervenant à l'interface en présence des huiles de démoulage lors du frottement.

La nature de l'huile ainsi que la formulation des bétons sont les deux paramètres étudiés. Une comparaison entre l'interface béton/huile/coffrage et l'interface béton/coffrage sera discutée dans cette partie.

V.5.1 Bétons ordinaires

Le comportement des bétons frais (quatre bétons ordinaires à 28%, 30%, 32% et 34% de volume de pâte) a été étudié à l'interface en fonction de la nature de l'huile. La Figure V-16 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage.

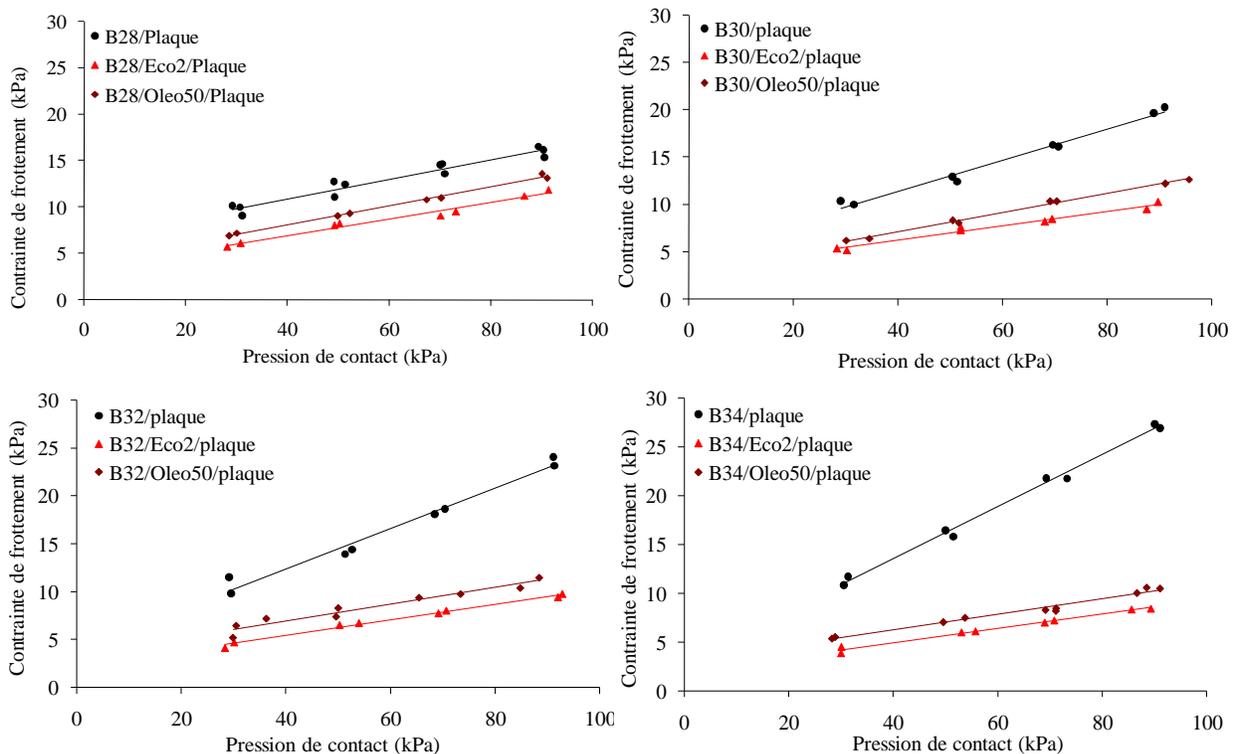


Figure V-16 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage en présence des bétons ordinaires.

Le Tableau V-2 récapitule les taux de réduction des contraintes de frottement en présence des huiles de démoulage pour les bétons ordinaires (B28, B30, B32 et B34). Le calcul du taux

réduction des contraintes de frottement pour l'interface béton/huile/plaque a été effectué par rapport à l'interface béton/plaque. Dans le cas de l'huile végétale (Eco2), le taux de réduction est plus élevé que l'huile minérale Oleo 50.

		Pression (kPa)			
		30	50	70	90
B28/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	9,71	12,07	14,27	16,01
B28/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	39.26	32.62	34.84	27.97
	Contraintes de frottement (kPa)	5,90	8,13	9,3	11,53
B28/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	27.37	24.09	23.66	16.57
	Contraintes de frottement (kPa)	7,06	9,16	10,89	13,36
B30/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	10,18	12,67	16,21	19,93
B30/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	48.48	41.08	48.63	50.49
	Contraintes de frottement (kPa)	5,24	7,46	8,33	9,87
B30/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	38.02	35.36	36.36	37.67
	Contraintes de frottement (kPa)	6,31	8,19	10,32	12,42
B32/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	10,65	14,16	18,38	23,65
B32/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	58.75	53.39	57.24	59.53
	Contraintes de frottement (kPa)	4,39	6,6	7,86	9,57
B32/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	45.28	48.45	47.82	53.68
	Contraintes de frottement (kPa)	5,83	7,85	9,59	10,95
B34/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	11,3	16,17	21,82	27,2
B34/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	63.05	62.57	67.38	69.08
	Contraintes de frottement (kPa)	4,17	6,05	7,12	8,41
B34/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	51.59	54.99	61.83	62.32
	Contraintes de frottement (kPa)	5,47	7,28	8,32	10,37

Tableau V-2 : Récapitulatif du pourcentage de réduction des contraintes de frottement pour les bétons ordinaires – effet des huiles de décoffrage.

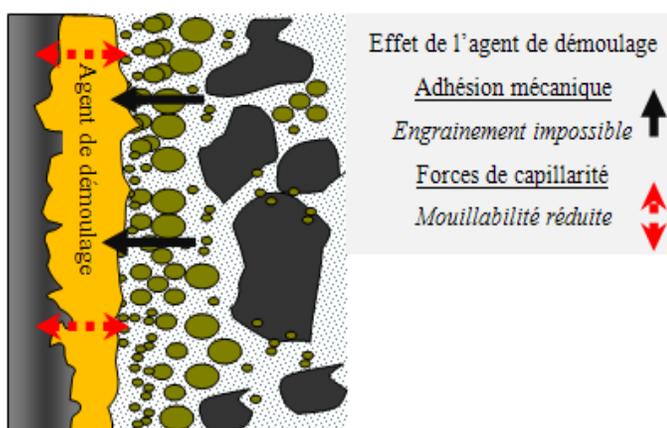


Figure V-17 : Effet de l'huile de démoulage sur l'adhésion entre le béton et le coffrage.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact est moins prononcée pour l'interface béton/huile/coffrage. La présence

de l'huile de démoulage sur la plaque métallique permet de réduire les frottements à l'interface grâce au film présent entre le béton et la plaque métallique.

Les huiles limitent la pénétration des fines particules dans les aspérités de la plaque lors du passage du béton (Figure V-17), ce qui minimise l'adhésion et les contraintes de frottement en présence de l'huile de démoulage.

L'utilisation de l'huile de démoulage diminue les forces de capillarité en réduisant la capacité de la plaque à être mouillée par l'eau [89] [2], et augmente la résistance au transfert de charges.

De plus, les résultats de la Figure V-16 montrent que l'huile végétale (Eco2) est plus efficace pour réduire le frottement du béton contre le coffrage quelle que soit la formulation testée. Ces résultats observés pour les deux huiles étudiées sont identiques à ceux trouvés par Libessart [1]. Ces résultats sont cohérents avec les modèles proposés pour les huiles minérales et végétales, dans le chapitre précédent.

Un effet chimique qui consiste en une réaction de saponification entre un ester et les hydroxydes de calcium s'accompagne d'une organisation en double couche huile/savon, à l'interface béton/coffrage. Comme le montrent les essais au tribomètre, cette configuration est favorable à la réduction des frottements dans le cas d'une huile à base végétale (Eco2) (Figure V-18).

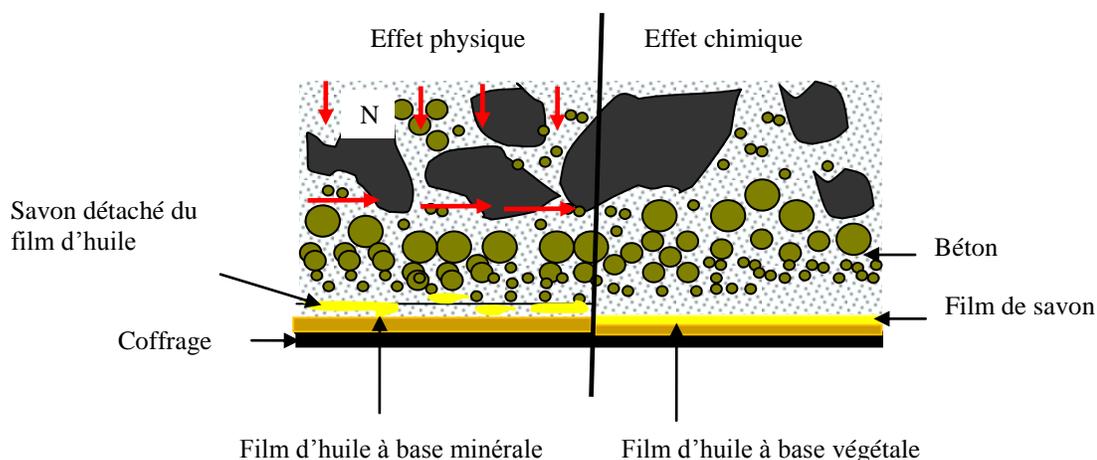


Figure V-18 : Effets présents à l'interface béton/huile/coffrage.

L'effet physique est défini par la nature hydrophobe de l'huile minérale qui empêche le béton d'adhérer au coffrage. L'effet physique « barrière » est contrôlé par l'épaisseur du film, qui dépend elle-même de la quantité de savons formée qui émulsionne partiellement le film.

Dans le cas d'une huile végétale, le cisaillement à l'interface se produit dans le film de savon c'est-à-dire, la couche limite glisse sur le film de savon. Par contre, dans le cas d'une huile minérale, la couche limite glisse sur le film d'huile.

V.5.1.1 Comparaison des épaisseurs de film

L'objectif de cette mesure est de connaître l'épaisseur du film d'huile après le passage du béton sur la plaque métallique. Cette mesure permet d'identifier la quantité d'huile qui participe à la formation des milieux émulsionnés à proximité de la paroi.

Pour ce faire, la méthode par pesée a été retenue. Cette technique est simple à utiliser, elle a été validée par Libessart [1] en comparant cette méthode avec les techniques PIXE. Le film a été pulvérisé à l'aide d'un pulvérisateur de type « Ecospray », de façon continue sur la plaque métallique afin éviter un excès d'huile.

Dans un premier temps, l'épaisseur de film a été déterminée avant et après le passage du système d'étanchéité (porte-échantillon vide) sur un échantillon circulaire découpé dans une paroi de coffrage de 3 cm de diamètre. Les pesées ont été réalisées avec une balance de 0.001g de précision. L'épaisseur de film se calcule à l'aide l'équation suivante :

$$e = \frac{m_h - m_s}{\rho_h \cdot S_p} \quad \text{V-1}$$

Avec ρ_h et S_p étant la masse volumique de l'huile et la surface de la pastille. m_s et m_h représente respectivement la masse de la pastille sèche et la masse de la pastille huilée avant ou après le passage du système d'étanchéité.

Le Tableau V-3 présente les variations d'épaisseurs obtenues pour les films d'huile après le passage du système d'étanchéité. La pulvérisation permet d'avoir des épaisseurs de film d'huile comprises entre 3.8 et 3,9 μm .

Huiles	Avant le passage (μm)	Après le passage (μm)
Eco2	8.27	3.8
Oleo50	7.9	3.9

Tableau V-3 : Epaisseur de film d'huile avant et après le passage du système d'étanchéité.

L'efficacité optimale est obtenue lorsque l'application est effectuée sans manque ni surcharge. Une surcharge peut provoquer de petites cavités dans le béton mis en place. Il est donc important de respecter les indications des fabricants concernant la quantité à appliquer [5] [1] [68].

Dans un deuxième temps, la mesure de l'épaisseur du film d'huile a été effectuée après le passage du béton frais sur la plaque métallique pour chaque pression de contact. La méthode est similaire à celle utilisée pour déterminer l'épaisseur initiale du film d'huile (avant frottement). Le taux de réduction du film d'huile ($\%R$) a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\%R = \frac{e_f}{e_i} \times 100 \quad \text{V-2}$$

e_f et e_i représente respectivement l'épaisseur du film d'huile initiale et finale.

La Figure V-19 présente la variation du taux de réduction du film d'huile en fonction de la pression de contact après le passage du béton frais, pour les deux huiles étudiées.

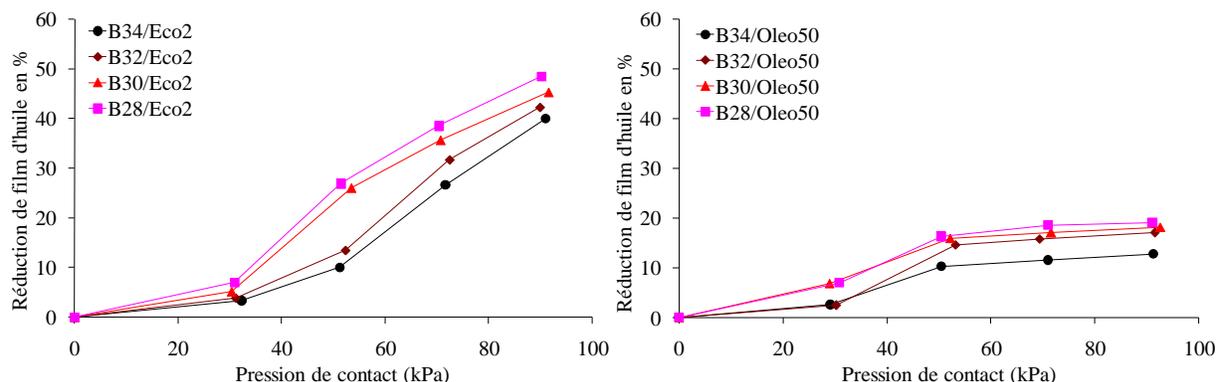


Figure V-19 : Variation de l'épaisseur du film d'huile en fonction de la pression de contact.

Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur du film d'huile diminue lorsque la pression de contact augmente. Ce phénomène est plus prononcé pour l'huile végétale (Eco2). Des résultats identiques ont été trouvés par Libessart [1].

Après le passage du béton frais, l'épaisseur du film d'huile végétale (Eco2) perd 40 à 50% environ de son épaisseur initiale en fonction du volume de pâte. Ce phénomène est accentué lorsque les bétons ont des volumes de pâte plus faibles.

L'huile minérale (Oleo50) perd 10 à 20% environ de son épaisseur initiale en fonction du volume de pâte. Au-delà d'une certaine pression de contact, l'épaisseur reste constante.

On peut supposer qu'avec un faible volume de pâte, la teneur plus élevée en sable dans la couche limite des bétons provoque une altération du film d'huile.

D'autre part, pour l'huile végétale (Eco2), c'est principalement la formation de savons à partir des esters et des acides gras contenus dans l'huile, qui est à l'origine de la réduction de l'épaisseur du film. Le phénomène de solubilisation du film par les savons est limité par la structuration du film en double couche, grâce aux groupements polaires (têtes polaires) des esters et des carboxylates.

Pour l'huile minérale (Oleo50), la réduction du film peut être attribuée à un phénomène de solubilisation du film par le savon formé (à partir de l'acidifiant) sous l'effet de la pression de contact. En effet, la formation d'émulsion qui accompagne la solubilisation du film est sensible à l'effet mécanique (frottement), ce qui explique que la réduction du film soit proportionnelle à la pression du contact. La quantité de savon étant plus limitée que dans le cas de l'huile végétale (Eco2), un seuil correspondant à un maximum de solubilisation est atteint.

V.5.1.2 Comportement des huiles de démoulage

La Figure V-20 illustre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les deux huiles. On observe une diminution des contraintes de frottement lorsque le volume de pâte augmente pour les deux huiles de démoulage.

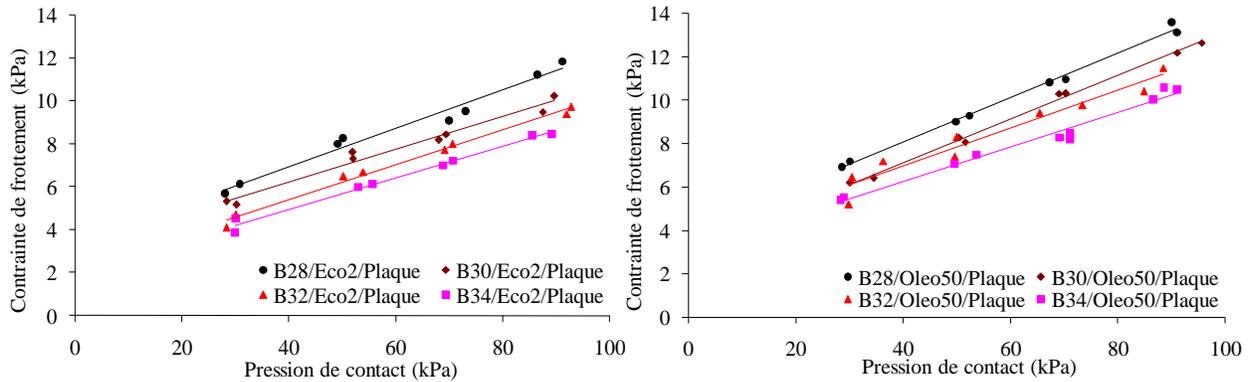


Figure V-20 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact et du volume de pâte, pour les deux huiles.

La présence de l'huile inverse l'effet de volume de pâte observé à l'interface béton/coffrage sans huile de démoulage. Ce phénomène est probablement dû au rôle lubrifiant de la couche limite à l'interface béton/huile/plaque.

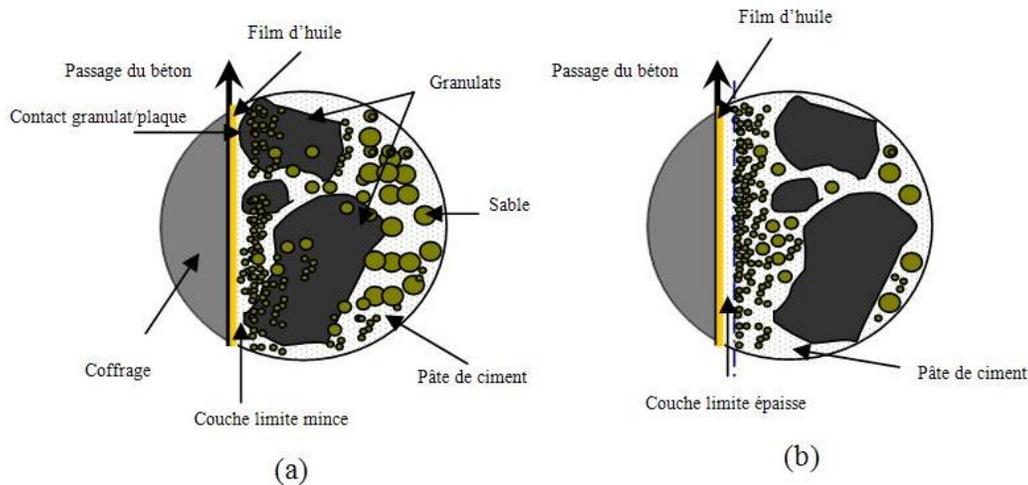


Figure V-21 : Représentation schématique de l'influence du volume de pâte sur l'interface béton/huile/coffrage : (a) volume de pâte faible et (b) volume de pâte important.

Le béton frais contrairement à son aspect ne se présente pas comme un milieu continu. Les différents éléments du béton vont avoir des rôles spécifiques durant le frottement. Dans le cas des bétons à volume de pâte faible, l'épaisseur de la couche limite (Figure V-21-a) n'est pas suffisamment importante pour empêcher le contact des granulats sur la surface métallique

(phénomène observé dans le chapitre III). Ce phénomène provoque des ruptures de film d'huile à l'interface et une perte plus importante du film d'huile.

Dans une telle configuration, en l'absence d'huile, nous avons vu que le frottement entre les granulats et la plaque métallique agit en tant que force de résistance aux déplacements en augmentant les contraintes de frottement. En présence d'huile, ce phénomène provoque des ruptures de film d'huile à l'interface, d'où la réduction d'épaisseur de film observée qui pénalise les contraintes de frottement. Ce processus chimique de formation de savon apparaît encore une fois comme l'étape clé de la réduction des frottements.

Un volume de pâte est élevé dans un béton conduit à une épaisseur de la couche limite plus importante (phénomène observé dans le chapitre III), avec un contact granulat/plaque minimisé, ce qui facilite le glissement du béton sur le film d'huile et génère les contraintes de frottement minimales. Enfin, on peut noter que l'huile végétale (Eco2) génère dans tous les cas, des contraintes de frottement plus faibles, que l'on peut corrélérer à l'efficacité de la double couche savon/ester.

V.5.2 Béton adjuvantés

V.5.2.1.1 Influence de la nature de l'huile

Pour comprendre l'effet du dosage en superplastifiant, quatre bétons adjuvantés dosés à 30 et 34% de pâte et un béton autoplaçant (BAP) dosé à 36 % de pâte ont été étudiés en présence des deux huiles de démoulage (Eco2 et Oléo50).

La Figure V-22 présente l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage. Cette figure illustre une comparaison entre ces deux interfaces pour des bétons adjuvantés.

On observe des évolutions de contraintes de frottements assez proches quel que soit le béton donc quelle que soit le volume de pâte ou le dosage en adjuvant. La nature de l'huile a également assez peu d'influence sur les contraintes de frottement, même si on note un léger avantage pour l'huile végétale (Eco2).

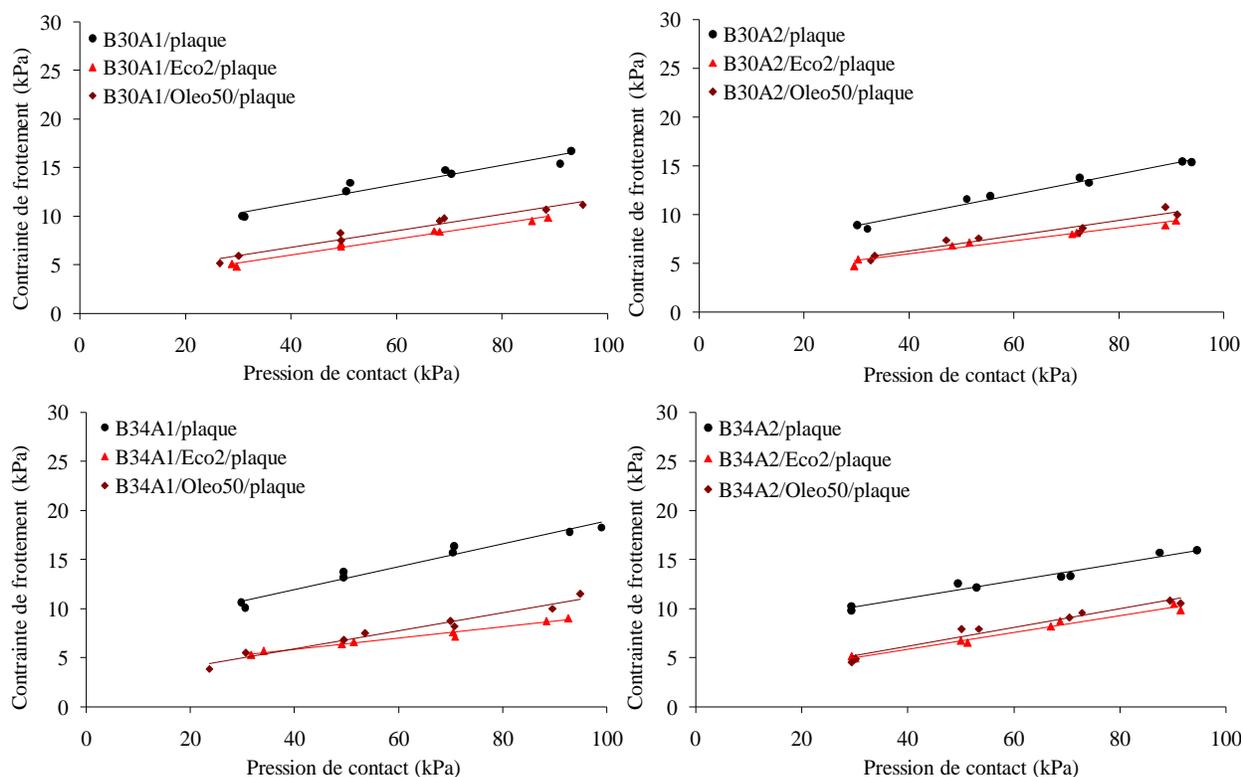


Figure V-22 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces béton/coffrage et béton/huile/coffrage en présence des bétons adjuvantés.

La Figure V-23 montre l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces BAP/coffrage et BAP/huile/coffrage dans le cas des deux huiles. Les résultats obtenus confirment que le superplastifiant dans un béton frais induit un comportement à l'interface quasi-identique pour les deux huiles de démoulage.

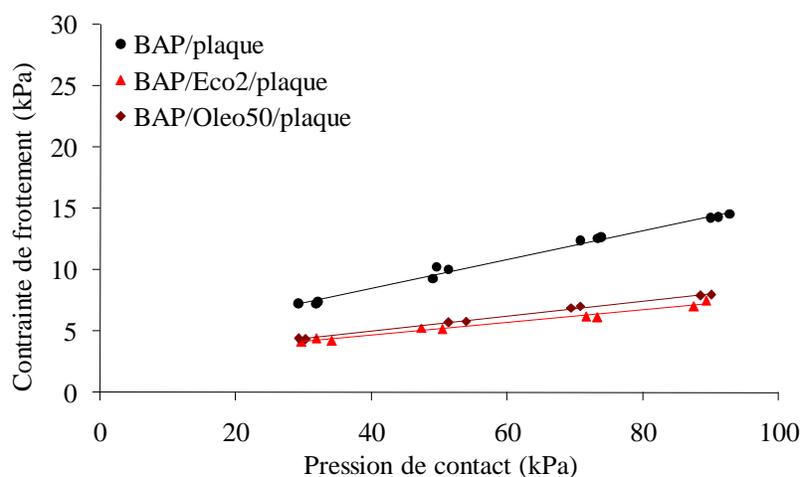


Figure V-23 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les interfaces BAP/coffrage et BAP/huile/coffrage en présence des deux huiles de démoulage.

Le Tableau V-4 récapitule les taux de réduction des contraintes de frottement en présence des huiles de démoulage pour les bétons adjuvantés et le béton autoplaçant (BAP).

		Pression (kPa)			
		30	50	70	90
B30A1/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	9,95	12,01	14,56	6,02
B30A1/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	50,30	41,67	41,86	39,64
	Contraintes de frottement (kPa)	4,94	7	8,46	9,67
B30A1/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	44,57	34,47	33,79	31,87
	Contraintes de frottement (kPa)	5,51	7,87	9,64	10,91
B30A2/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	8,73	11,75	13,52	15,37
B30A2/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	41,92	40,41	40,33	40,33
	Contraintes de frottement (kPa)	5,06	6,61	8,47	10,18
B30A2/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	36,48	36,20	38,04	28,68
	Contraintes de frottement (kPa)	5,54	7,5	8,38	10,38
B34A1/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	10,32	13,43	16,04	8,05
B34A1/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	50,99	50,76	47,16	43,57
	Contraintes de frottement (kPa)	5,06	6,61	8,48	10,19
B34A1/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	54,58	46,67	47,10	40,42
	Contraintes de frottement (kPa)	4,69	7,17	8,49	10,76
B34A2/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	8,7	11,84	13,27	15,83
B34A2/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	46,68	51,62	53,99	50,78
	Contraintes de frottement (kPa)	5,51	6,50	7,38	8,89
B34A2/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	54,29	41,05	41,65	40,86
	Contraintes de frottement (kPa)	4,72	7,92	9,36	10,68
BAP/Plaque	Contraintes de frottement (kPa)	7,27	9,87	12,51	14,34
BAP/Eco2/Plaque	Taux de réduction (%)	41,09	46,05	50,58	49,51
	Contraintes de frottement (kPa)	4,24	5,22	6,16	7,26
BAP/Oleo50/Plaque	Taux de réduction (%)	39,64	40,52	44,62	44,82
	Contraintes de frottement (kPa)	4,37	5,76	6,98	7,94

Tableau V-4 : Récapitulatif du pourcentage de réduction des contraintes de frottement pour les bétons adjuvantés et le béton autoplaçant (BAP) - effet des huiles de décoffrage.

Le calcul du taux réduction des contraintes de frottement pour l'interface béton/huile/plaque a été effectué par rapport à l'interface béton/plaque. On observe que le comportement des deux huiles est proche pour les dosages élevés en superplastifiant. Le taux de réduction des contraintes de frottement est de 36 à 50% pour 30 kPa et 28 à 49% pour 90%.

Compte tenu de la teneur élevée en fines pour ces bétons adjuvantés, la couche limite peut s'enrichir en éléments fins, ce qui augmente son épaisseur à l'interface béton/huile/coffrage. Ce phénomène favorise le glissement du béton sur le film d'huile et diminue la probabilité d'altérer le film d'huile présent à l'interface.

De plus, on a vu que les milieux interstitiels sont plus visqueux pour les bétons adjuvantés, leur viscosité pouvant atteindre 100 mPa.s (Chapitre IV). Ce phénomène peut également empêcher les ruptures de film d'huile lors du frottement.

Nous avons vu également que le superplastifiant stabilise les émulsions savon/huile ce qui confère un milieu interstitiel favorable à la réduction des frottements. Les résultats confirment donc que la présence d'un superplastifiant rapproche les niveaux de performances des deux huiles en matière de lubrification.

V.5.2.1.2 Comparaison des épaisseurs du film d'huile

La Figure V-24 présente l'évolution du taux de réduction du film d'huile en fonction de la pression de contact après le passage du béton frais, pour les deux huiles étudiées.

Les résultats obtenus montrent pour les deux huiles, des variations d'épaisseurs de film assez proches, correspondant à des pertes d'épaisseurs de 25 à 65% par rapport à l'épaisseur initiale. Par rapport au béton ordinaire, l'huile minérale (Oleo50) présente des épaisseurs de film plus faibles.

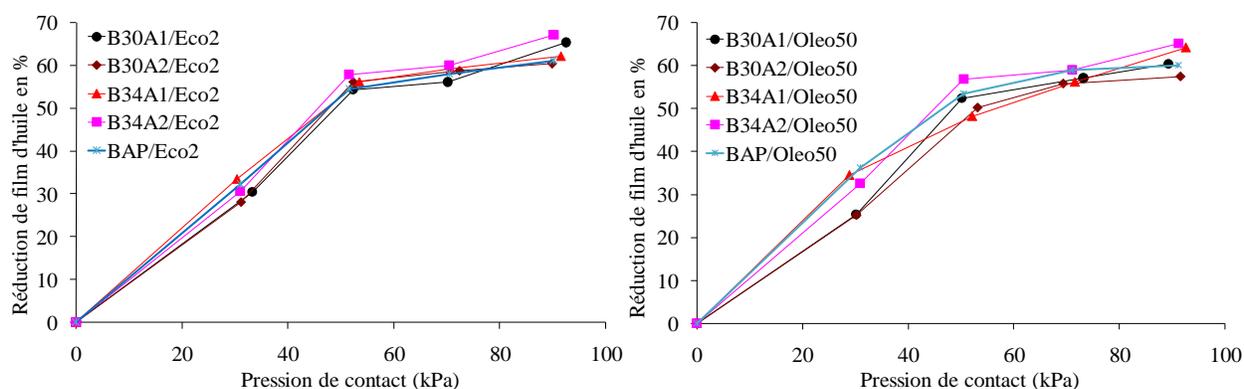


Figure V-24 : Variation de l'épaisseur du film d'huile en fonction de la pression de contact.

On observe que l'épaisseur des films dépend très peu du dosage en superplastifiant. Les résultats indiquent également que les propriétés tensio-actives du superplastifiant contribuent à émulsionner une partie du film d'huile, notamment pour l'huile minérale (Oleo50), donnant ainsi des profils d'épaisseurs comparables pour les deux huiles.

En conclusion, les épaisseurs de film dépendent de la nature de l'huile, de la quantité de savons formés, de la présence d'un superplastifiant et de l'effet mécanique qui s'exerce à l'interface béton/huile/coffrage.

V.5.2.1.3 Influence du dosage en superplastifiant

Les Figure V-25 et V-26 présentent l'évolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour les bétons dosés à 30 et 34% de pâte pour les deux huiles de démoulage.

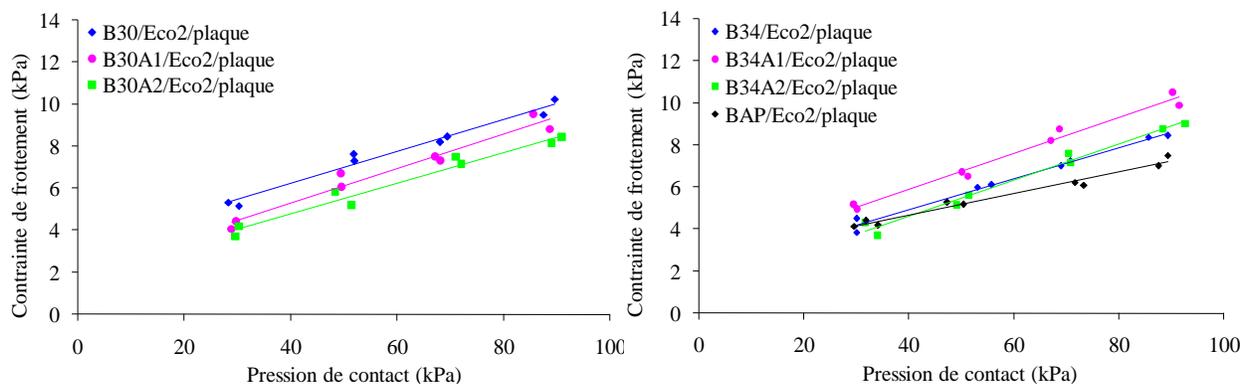


Figure V-25 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour l'huile végétale (Eco2) - effet du dosage en superplastifiant.

En définitive, la présence du superplastifiant masque l'influence du volume de pâte et l'effet de l'épaisseur du film. Les conséquences de l'addition du superplastifiant sur les contraintes de frottement sont en définitive assez modérées. Le gain est plus net dans le cas du béton autoplaçant (BAP) associé à l'huile minérale (Oleo50). Finalement, des profils de frottement similaires sont obtenus pour les interfaces BAP/Eco2 et BAP/Oleo50.

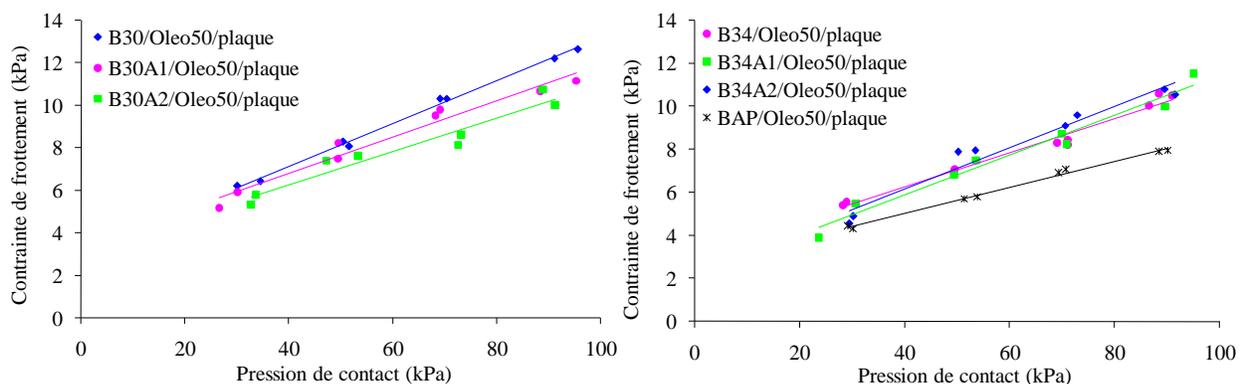


Figure V-26 : Evolution de la contrainte de frottement en fonction de la pression de contact pour l'huile minérale (Oleo50) - effet du dosage en superplastifiant.

Dans le cas de l'huile minérale (Oleo50), l'addition du superplastifiant réduit l'effet barrière en diminuant l'épaisseur du film, mais favorise la formation d'un milieu émulsionné stable qui améliore les propriétés lubrifiantes à l'interface.

V.5.2.2 Bilan des phénomènes à l'interface béton/huile/coffrage

Dans le chapitre IV, on a montré qu'en présence des bétons ordinaires, les milieux interstitiels peuvent contenir des teneurs en huile comprises entre 2 et 17% en fonction de la pression de contact. Les profils de contraintes de frottements observés sont cohérents avec les observations faites dans le chapitre précédent ; à savoir, la formation de savon est plus abondante dans le cas de l'huile végétale (Eco2) que dans le cas de l'huile minérale, ce qui confère une

meilleure stabilité et donc une efficacité accrue de l'émulsion interstitielle. L'huile minérale (Oleo50) est plus facilement émulsionnée par le savon, que l'huile d'origine végétale, car celui-ci ne forme pas de film mais se disperse.

Les corrélations établies entre les profils des contraintes de frottement et les mesures physico-chimiques permettent ainsi de compléter les modèles de lubrification décrits dans la thèse de Libessart [1]. Il existe deux processus qui conduisent à la réduction de l'épaisseur du film d'huile :

- La mise en émulsion des hydrocarbures (huile minérale) et les esters (huile végétale) par les savons formés, et, dans le cas de l'huile minérale, par le superplastifiant,
- La transformation des esters en savon (par saponification), catalysée par les acides gras (acidifiant) présents dans la formulation, et eux même transformés en savon (sels d'acides gras).

Dans le cas de l'huile minérale, l'addition du superplastifiant génère deux phénomènes en compétition :

- Premier phénomène : la fragilisation du film d'huile dont l'épaisseur est réduite.
- Deuxième phénomène : la formation d'un milieu tampon émulsionné et stabilisé par le superplastifiant.

Libessart [1] avait montré qu'une présence accrue d'acidifiant pénalisait les contraintes de frottement, dû à la prépondérance du premier phénomène. Nos travaux montrent que pour l'huile minérale (Oleo50), la présence du superplastifiant est favorable à la réduction des contraintes de frottement. Le deuxième processus compense alors la perte de performances due à la fragilisation du film.

Dans le cas de l'huile à base végétale, en l'absence du superplastifiant, la formation abondante de savon à partir d'ester se traduit par une réduction de l'épaisseur de film, mais avec des performances lubrifiantes préservées par la couche de savon. Le superplastifiant a tendance à accroître cette réduction du film, mais sans pénaliser les contraintes de frottement, grâce à la couche de savon et à l'émulsion interfaciale.

En absence de superplastifiant, l'huile végétale (Eco2) reste plus performante que l'huile minérale (Oleo50) pour réduire les frottements. La présence du superplastifiant rapproche les comportements des deux huiles.

V.6 Conclusion

Les essais tribométriques ont permis de mettre en évidence l'influence de la composition du béton et la nature de l'huile de démoulage sur les frottements du béton frais contre le coffrage.

La première partie de ce chapitre a permis de montrer l'influence de la teneur en fines dans un béton et le dosage en superplastifiant sur le comportement tribologique à l'interface béton/coffrage sans huile de démoulage. L'augmentation du volume de pâte conduit à une augmentation des contraintes de frottement à l'interface béton/coffrage. Ce phénomène est lié à la teneur élevée en particules pâte dans la couche limite.

La présence du superplastifiant dans un béton diminue les contraintes de frottement à l'interface béton/paroi. Les résultats du BAP et les quatre bétons adjuvantés confirment que l'augmentation du dosage en superplastifiant permet de réduire les contraintes de frottement. De plus, les résultats ont également montré une réduction notable des frottements pour le béton autoplaçant malgré son pourcentage élevé en pâte (36 % de pâte). Un dosage en superplastifiant supérieur à 0,7% nivelle l'impact du volume de pâte sur les frottements.

Pour les bétons ordinaires, les frottements du béton sur le coffrage sont atténués par la formation de savons, notamment pour l'huile d'origine végétale, qui produit une interface organisée et une émulsion abondante.

Pour les bétons adjuvantés, le dosage en superplastifiant génère des performances assez proches à l'interface béton/huile/coffrage pour les deux huiles. Dans ces conditions, l'huile végétale (Eco2) garde un léger avantage sur l'huile minérale (Oleo50). Sous l'action du passage du béton frais sur le coffrage, le pouvoir tensio-actif du superplastifiant conduit à la formation d'une émulsion stable huile/savon, qui favorise le glissement du béton sur le film d'huile et gouverne alors les performances lubrifiantes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Actuellement, les formulations des huiles de démoulage ont beaucoup évoluées et se sont diversifiées. Depuis quelques années, des nouvelles formulations d'huiles de démoulage à base végétale sont apparues sur le marché pour répondre à des exigences environnementales et sanitaires. Les méthodes utilisées pour optimiser les performances des huiles de démoulage se sont longtemps reposées sur des modifications des propriétés de mouillabilité et d'adhésion ou de rhéologie. Les propriétés physico-chimiques des huiles de démoulage lors du glissement du béton frais sur les parois coffrantes, ont été plus récemment mises en évidence par les chercheurs. En fait, comprendre les comportements des huiles lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages est plutôt difficile, et nécessite des techniques et une méthodologie bien adaptées. Les perspectives esthétiques et économiques offertes par la maîtrise des actions physico-chimiques au voisinage du coffrage suscitent un vif intérêt, pour éclaircir les mécanismes de frottement à l'interface béton/huile/coffrage.

Le but de cette étude était d'identifier et de comprendre l'influence de la formulation du béton et de la nature des huiles de démoulage sur le comportement tribologique à l'interface béton/huile/coffrage. Pour atteindre cet objectif, il était indispensable de mener une analyse complète au voisinage de la paroi coffrante et d'étudier les interactions entre les huiles de démoulage et les composants du béton frais afin d'expliquer les mécanismes des frottements intervenant lors de la mise en œuvre du béton dans les coffrages.

Dans une première partie, l'étude bibliographique a permis de faire un état des connaissances sur l'ensemble des tribomètres à béton existants. Il en ressort une diversité des appareils qui dépendent de l'application industrielle ciblée. La plupart des appareils proposés dans la littérature a été consacrée à l'étude des frottements du béton frais contre les conduites utilisées pour le pompage des bétons. Cependant, peu de tribomètre permet de déterminer les frottements à l'interface béton/huile/coffrage. Les recherches effectuées dans le domaine de frottement du béton contre une paroi ont montré que le cisaillement se produit à l'interface béton/paroi sur une couche mince appelée couche limite. De façon plus précise, le tribomètre conçu par Y. Vanhove [10] reprend les mêmes conditions que celles d'un chantier. Il permet d'étudier différents types de bétons, quelle que soit leur consistance. Grâce à cet appareil, l'influence de la pression de contact, la vitesse de frottement et l'état de surface peuvent être évalués. Dans le cadre de cette étude, ce tribomètre a permis de déterminer les contraintes de frottement à l'interface béton/huile/coffrage, avec et sans huiles de décoffrage, et d'analyser le comportement physico-chimique de l'interface.

Le deuxième chapitre avait pour but de présenter la composition des bétons utilisée dans cette étude. Ensuite, une description de chaque constituant employé, les procédures de malaxage ainsi que les essais de caractérisation des bétons à l'état frais ont été réalisés. Ce chapitre a permis de définir les fines, la pâte et le squelette granulaire des bétons. Les particules fines

représentent le ciment et le filler calcaire. Leur taille est inférieure à 80 μm dans cette étude. En présence d'eau et éventuellement de superplastifiant, ces éléments fins forment un mélange appelé « pâte ». Le squelette granulaire est constitué du sable et des gravillons. Les essais de caractérisation des bétons a permis de vérifier que la classe de consistance visée des bétons ordinaires adjuvantés ou non sont de classe S3 très plastique. Le béton autoplaçant (BAP) est quant à lui de classe SF1 selon les recommandations de l'AFGC avec un étalement de 650 ± 5 mm.

La caractérisation rhéologique de ces bétons a montré que leur comportement est de type binghamien. De plus, les résultats ont montré que les paramètres rhéologiques dépendent de la formulation des bétons. En effet, une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique est observée lorsque le volume de pâte augmente et le dosage en superplastifiant diminue.

Une analyse des propriétés des bétons ordinaires sans adjuvant au voisinage de la paroi coffrante a été réalisée dans le troisième chapitre. La densité de cette couche à l'état durci a été mesurée sur des éprouvettes cylindriques en fonction de l'épaisseur de l'échantillon afin d'identifier l'effet de la pression de contact et le volume de pâte sur la densification du matériau à l'interface béton/coffrage. Cette étude a montré que la pression de contact a une influence importante sur les conditions d'interface. La densité augmente avec le volume de pâte pour les faibles pressions et reste stable pour les pressions élevées.

L'étude de la couche d'interface à l'état frais a permis d'identifier l'épaisseur, la composition et le rapport E/L de cette couche à l'approche de la paroi coffrante en fonction du volume de pâte et de la pression de contact. Les résultats obtenus ont montré que l'épaisseur moyenne de la couche augmente avec l'accroissement de la teneur en fine. L'analyse granulométrique a révélé que la couche d'interface des quatre bétons possède 70 % environ des grains de taille inférieure à 0,315 mm. Avec 70 à 90 % de tamisat cumulé, les bétons possédant plus de pâte, présentent davantage d'éléments fins de diamètre 0,63 mm. Un léger enrichissement en grains de 40 μm a été constaté pour des pressions élevées (50 et 90 kPa). Cet enrichissement du béton au voisinage de la paroi concerne uniquement les particules inférieures provenant du ciment et du filler calcaire. Les résultats obtenus ont également montré une diminution importante des grains de 80 μm lorsque la pression de contact augmente.

La quantité de pâte mobilisée pour former cette couche à l'interface béton/coffrage dépend de la pression de contact et du volume de pâte. Les bétons à volume de pâte élevé fournissent davantage de fines et de sable. De plus, une légère augmentation de la quantité d'eau mobilisée pour former la couche limite à l'interface a été constatée, lorsque le volume de pâte et la pression de contact augmentent. Cette étude a également permis de vérifier que le rapport E/L à l'interface béton/coffrage est plus important que celui du béton pour des pressions inférieures à 90 kPa. Une diminution de ce rapport a été constatée lorsque le volume de pâte est élevé. Ce phénomène est expliqué par la teneur élevée en pâte à l'interface qui empêche la migration de l'eau vers la

plaque métallique. Pour une pression de contact de 90 kPa, le rapport E/L à l'interface est identique pour l'ensemble des bétons avec valeur équivalente à celle du béton.

Le chapitre 4 a été consacré à l'étude physico-chimique des interfaces béton/huile et huile coffrage. Le but de cette étude était d'identifier les interactions entre le béton, les huiles de démoulage et le coffrage afin de mieux comprendre les processus physico-chimiques et d'expliquer les phénomènes qui gouvernent l'évolution des frottements à l'interface béton/huile/coffrage. Les résultats ont montré que les deux huiles de démoulage retenues pour cette étude (une huile minérale (Oleo50) et une huile d'origine végétale (Eco2)) ont un comportement rhéologique de type newtonien. Pour les deux huiles, on obtient, sur la plaque métallique, un film d'épaisseur initiale de 3.9 μm , avant le passage du béton frais. Il a été noté que l'huile minérale a plus d'affinité que l'huile végétale, avec la plaque métallique.

La quantité d'eau présente à l'interface béton/coffrage dépend du volume de pâte, du rapport E/L et de la pression de contact. Pour les bétons ordinaires sans adjuvant, une augmentation de la teneur en fines dans un béton conduit une diminution de la quantité d'eau libre à l'interface. En présence du superplastifiant, l'augmentation du rapport E/L dans les bétons provoque un accroissement de la quantité d'eau collectée. Les milieux interstitiels formés à partir de la solution interstitielle des bétons et de l'huile de démoulage montrent que l'augmentation du dosage en superplastifiant permet de réduire la tension interfaciale entre le milieu et la plaque métallique. De plus, la viscosité apparente des milieux formés avec des teneurs en huile supérieures à 10% augmente pour des dosages en superplastifiant élevés.

Le calcul des pourcentages en huile dans la solution interstitielle présente à l'interface béton/coffrage, a permis de reconstituer des milieux interstitiels avec des teneurs en huile de 5 et 10%. L'observation visuelle des mélanges a montré que la formation de savon est favorisée en présence de l'huile végétale (Eco2) et d'un dosage élevé en superplastifiant et en huile. La quantification de savon a permis de conclure que les milieux avec l'huile végétale (Eco2) génèrent davantage de savon qu'avec l'huile minérale (Oleo 50). Ce savon forme avec l'huile une émulsion épaisse qui se dépose sur la paroi et qui présente une organisation homogène de fines gouttelettes observées en microscopie.

De plus, les observations visuelles ont également montré que la formation d'un milieu émulsionné stable est favorisée par une teneur en superplastifiant élevée, avec une teneur de 10% en huile. La mesure des potentiels zêtas a montré que les émulsions à base d'huile végétale (Eco2) présentent une stabilité supérieure par rapport à l'huile minérale (Oleo50) quel que soit le dosage en superplastifiant. De plus, la stabilité des émulsions est meilleure en présence du superplastifiant.

Les essais tribométriques présentés dans le cinquième chapitre ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre plan/plan, évolution d'ancêtres développés par d'autres utilisateurs. Les résultats obtenus mettent en évidence que la composition du béton et la nature de l'huile de démoulage jouent un rôle très important sur les frottements aux interfaces béton /coffrage et béton/huile/coffrage.

L'influence du volume de pâte sur l'évolution de la contrainte de frottement à l'interface béton/coffrage sans huile de démoulage met en évidence l'importance de la teneur en fines et du dosage en superplastifiant dans un béton. Les contraintes de frottement à l'interface béton/coffrage augmentent avec le volume de pâte. Ce phénomène est lié à l'enrichissement de la couche limite en éléments fins, ce qui augmente la probabilité de piéger les grains de ciment dans la rugosité de la plaque métallique. Concernant les bétons avec superplastifiant, une diminution des contraintes de frottement est constatée lorsque le dosage en superplastifiant augmente. L'introduction du superplastifiant dans le béton améliore la mobilité des grains de ciment et du filler et permet une déformation plus facile du milieu sous cisaillement. Ce qui explique la diminution des contraintes de frottement. Un dosage en superplastifiant supérieur à 1% nivelle l'impact du volume de pâte sur les frottements.

En présence des huiles de démoulage à base végétale, le frottement du béton sur le coffrage est réduit par rapport aux essais avec l'huile minérale, quel que soit le volume de pâte. Ce phénomène s'accompagne d'une réduction de l'épaisseur du film d'huile végétale (Eco2) qui se transforme en savon puis en émulsion au voisinage du coffrage et permet de réduire les contraintes de frottement à l'interface. Dans ce cas, l'interface est le siège d'un effet chimique grâce à la réaction de saponification entre l'ester et les hydroxydes de calcium. Une structure organisée en couches savon/huile est efficace pour lubrifier l'interface.

Dans le cas des bétons adjuvantés, la présence du superplastifiant rapproche les comportements des deux huiles. Lors du frottement, le taux de réduction du film d'huile est identique pour les deux huiles. Le superplastifiant intervient pour abaisser les tensions interfaciales liquide/liquide ou liquide/paroi, et de ce fait favorise les échanges entre le film d'huile et la solution interstitielle.

Ainsi, grâce aux différentes techniques mises en œuvre, l'ensemble des données recueillies permettent de préciser les modes d'action des deux huiles par rapport aux connaissances acquises antérieurement. Dans les deux cas, nous avons confirmé le phénomène de solubilisation des films d'huile, émulsionnés par le(s) savon(s) formé(s). Mais, les modes d'action se différencient de part la nature des espèces chimiques en présence ;

Dans le cas de l'huile d'origine végétale, nous avons observé le rôle fondamental des savons formés à partir des esters et des acides gras. Ces savons interviennent pour organiser l'interface, pour stabiliser l'émulsion et pour réduire les frottements. Dans ce cas, la présence du superplastifiant conforte les performances lubrifiantes de l'interface, performances qui ne sont pas uniquement gouvernées par l'épaisseur du film.

Dans le cas de l'huile minérale, deux paramètres clés se dégagent ;

- Premièrement, il faut utiliser une teneur en acidifiant adéquate pour produire la juste quantité de savon, nécessaire au glissement, mais sans trop réduire l'épaisseur du film.

- Deuxièmement, le rôle du superplastifiant est important puisqu'il stabilise l'émulsion savon/huile sans altérer le film. Cette émulsion constitue une phase tampon favorable au glissement et à l'évacuation des bulles d'air.

Un contrôle de la quantité de savon formé apparaît donc indispensable dans les deux cas, mais plus critique dans le cas de l'huile minérale. Le rôle du superplastifiant est fondamental pour atteindre des performances élevées en présence d'huile minérale; il joue un rôle de moindre importance lorsqu'on utilise une huile d'origine végétale.

Ce travail ouvre également des perspectives concernant la caractérisation de la couche d'interface dans le cas de bétons adjuvés afin de déterminer la composition du béton au voisinage de la paroi coffrante. D'autres essais rhéologiques sur cette couche du béton à l'approche du coffrage peuvent être effectués pour mesurer le seuil et la viscosité d'interface. Une étude comparative avec des bétons autoplaçants contenant des agents de viscosité aurait l'intérêt de déterminer l'influence de cet agent sur le seuil et la viscosité d'interface. Enfin, l'étude physico-chimique des milieux interstitiels qui a été initiée mérite d'être approfondie en liaison avec la rhéologie interfaciale, pour valider et compléter les mécanismes du décoffrage, qui se sont dégagés dans cette étude.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] L. Libessart, «Influence de la composition des agents de démoulage à l'interface coffrage/béton - Impact sur l'esthétique des parements en béton,» Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, 2006.
- [2] «Produits de décoffrage,» *Bulletin du ciment*, n°115, 1993.
- [3] M. Martin, «Étude de la texture de la surface coffrée des parements verticaux en béton,» Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Paris, 2007.
- [4] J. Cairns, «Enhancement in surface quality of concrete through use of controlled permeability,» *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, n°12, pp. 73-86, 1999.
- [5] H.-E. Gram, «Discussion of possible reasons Surface defects of SCC,» *Betonwerk und Fertigteil-Technik*, vol. 70, n°8, pp. 28-33, 2004.
- [6] I. Hart, «Concrete release agent, associated materials and surface finishes,» *Concrete*, vol. 28, n° 12, p. 33–34, 1994.
- [7] K. Ichimiya K, T. Yamasaki et T. Idemitsu, «Influence of the wettability and angle of form on the characteristics of surface voids in self-compacting concrete,» chez *The Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, USA, 2005.
- [8] M. Hurd, «Choosing and using a form release agent,» *Concrete Construction*, vol. 41, n°110, p. 732–736, 1996.
- [9] S.-H. Kwon, Q.-T. Phung, H.-Y. Park, J.-H. Kim et S.-P. Shah, «Experimental Study on Effect of Wall Friction on Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete,» chez *6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Montreal, Canada , 2010.
- [10] Y. Vanhove, «Contribution à l'étude du frottement d'un béton autoplaçant contre une surface métallique – Application aux poussées contre les coffrages,» Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, 2001.
- [11] T. Proske, «Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton - Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung,» Thèse de doctorat, Université de technologie de Darmstadt, Darmstadt, 2007.

- [12] N. Roussel et G. Ovarlez, «A Physical Model for the Prediction of Pressure Profiles in a Formwork,» chez --*Proceedings of the 2nd North American conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2005) and the 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, USA, 2005.
- [13] F. Chapdelaine, «Etude sur la rhéologie du béton frais,» Mémoire de Master, Université de Laval, Canada, 1998.
- [14] T.-T. Ngo, «Influence de la composition des bétons sur les paramètres de pompage et validation d'un modèle de prévision de la constante visqueuse,» Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Paris, 2009.
- [15] J.-E. Wallevik, «Computational rheology, thixotropy explorations of cement pastes; An introduction,» chez *3 rd International Symposium on Self-Consolidating Concrete*, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003.
- [16] J.-E. Wallevik, «Thixotropic investigation on cement paste: experimental and numerical approach,» *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 132, n°11-3, p. 86–99, 2005.
- [17] B. Helnan-Moussa, «Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplaçants,» Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, 2009.
- [18] F. De Larrard, C.-F. Ferraris et T. Sedran, «Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material,» *Materials and Structures*, vol. 31, n°7, pp. 494-498, septembre 1998.
- [19] C.-F. Ferraris et F. De Larrard, «Testing and modelling of fresh concrete rheology,» *NISTIR 6094*, february 1998.
- [20] C.-F. Ferraris, «Measurement of the rheological properties of high performance concrete : state of the art,» *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 104, n°15, 1999.
- [21] C. Djelal, «Analyse du phénomène de frottement des mélanges eau-argile concentrés contre des surfaces métalliques,» Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Rennes, 1991.
- [22] C. Beaumel, «Estrusion des pâtes d'argiles,» Institut National Polytechnique de Grenoble Grenoble, 1998.
- [23] Y. Vanhove, «Analyse du frottement du béton frais contre des surfaces métalliques,» Mémoire de Master, Université d'Artois, Béthune, 1997.
- [24] J.-M. Georges, Frottement, usure et lubrification, la tribologie ou science des surfaces, CNRS Editions, Editions Eyrolles éd., Paris: Collection Sciences et Techniques de l'Ingénieur, 2000.

- [25] I.-M. Hutchings, *Friction and Wear of Engineering Materials*, London: Arnold, 1992.
- [26] Y. Vanhove, C. Djelal et T. Chartier, «Ultrasonic Wave Reflection Approach to Evaluation of Fresh Concrete Friction,» *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 6, n°12, pp. 253-260, 2008.
- [27] C. Djelal, Y. Vanhove et A. Magnin, «Tribological behaviour of self compacting concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n°15, pp. 821-828, 2004.
- [28] C. Djelal, P. De Caro, L. Libessart, I. Dubois et N. Pébère, «Comprehension of demoulding mechanisms at the formwork/oil/concrete interface,» *Materials and Structures*, vol. 41, n°3, p. 571–581, 2008.
- [29] D. Kaplan, «Pompage des bétons,» Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2000.
- [30] M. Barrioulet, «Contribution à l'étude des rôles respectifs joués par la pâte interstitielle et les granulats dans le comportement mécanique du béton avant prise du liant,» Thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier, Toulouse, 1977.
- [31] A. Alexandridis, «Mechanical Behavior of Fresh Concrete,» *Cement and Concrete research*, vol. 11, n°3, pp. 323-339, 1981.
- [32] H.-H. Bache, «Mekanisk stabilitet af frisk komprimeret beton,» *Nordisk Betong*, n°16, pp. 5-12, 1977.
- [33] H.-H. BACHE, «Flydeopførsel i beton ved betonfremstilling,» *Cementfabrikkernes tekniske Oplysningskontor*, 1987.
- [34] R. Lane, «Behavior of Fresh Concrete During Vibration,» *ACI report committee 309.1 R-93*, 1998.
- [35] M. Barrioulet et C. Legrand, «Etude des frottements intergranulaires dans le béton frais - Idées nouvelles sur l'écoulement du béton frais vibré,» *Matériaux et Construction, RILEM*, vol. 11, n°163, pp. 191-197, 1978.
- [36] R. L'Hermite, «The rheology of fresh concrete and vibration,» *C&C A Library Translation Cj.9*, 1949.
- [37] P. Baudeau, «Contribution à l'étude du comportement rhéologique du béton contenu dans des parois coffrantes de grande hauteur avant prise du ciment,» Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 1983.

- [38] C.-A. Graubner et T. Proske, «Formwork Pressure: A New Concept for the Calculation,» chez *Proceedings of the 2nd North American conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC 2005) and the 4th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, USA, 2005.
- [39] N. Bleschik, «Les propriétés mécaniques et la rhéologie des bétons,» *Minsk*, p. 229, 1977.
- [40] Y. Tanigawa, H. Mori, K. Tsutsui et Y. Kurokawa, «Constitutive law and yield condition of fresh concrete,» *Transaction of the Japan Concrete Institute*, vol. 9, pp. 47-54, 1987.
- [41] H. Fujiwara et S. Nagataki, «Study on self-compactibility of high-fluidity concrete,» chez *Proceedings of the first international RILEM Symposium, PRO 1999*, 1999.
- [42] Y. Vanhove, C. Djelal et A. Magnin, «device for studying fresh concrete friction,» *Cement Concrete and Aggregates*, vol. 26, n°12, pp. 35-41, 2004.
- [43] F. Chapdelaine, «Etude fondamentale et pratique sur le pompage du béton,» Thèse de doctorat, Université de Laval, Canada, 2007.
- [44] A.-N. Ede, «The resistance of concrete pumped through pipelines,» *Magazine of concrete research*, vol. 9, n°127, pp. 129-140, 1957.
- [45] J. Best et R. Lane, «Testing for Optimum Pumpability of Concrete,» *Concrete International*, vol. 2, n°110, pp. 9-1, octobre 1960.
- [46] M. Morinaga, «Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines,» chez *Fresh Concrete : Important Properties and heir Measurement, Proceeding of a RILEM Seminar Held March*, Leeds, 1973.
- [47] C. Hu, «Rhéologie des bétons fluides,» Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1995.
- [48] A. Neville, *Properties of Concrete*, Fourth Edition éd., London: Longman Group imited, 1995, p. 844.
- [49] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand et E. Forssberg, «Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 30, n°40, p. 274–282, 2008.
- [50] L. Cassar, *Nouveaux matériaux bétons*, Ecole thématique CNRS – ATILH « Matériaux cimentaires », 2005.
- [51] C. Jolicoeur, P.-C. Nkinamubanzi et M.-C. Simard, «Progress in understanding the functional properties of superplasticizer in fresh concrete,» *ACI SP-148*, pp. 63-88, 1994.
- [52] A. F. d. G. C. (AFGC), «Les betons autoplacants». 2000.

- [53] O. Baron, Durabilité des bétons, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1996.
- [54] F. De Larrard, Structures granulaires et formulation des bétons, Paris: Etudes et recherche des laboratoires des ponts et chaussées, 2000.
- [55] E.-P. Koehler, «Development of a Portable Rheometer for Portland Cement Concrete,» University of Texas, Austin, 2004.
- [56] E.-P. Koehler, D.-W. Fowler, C.-. F. Ferraris et S. Amziane, «A New Portable Rheometer for Fresh Self-Consolidating Concrete,» chez *Proc. of session ACI*, New York, 2005.
- [57] F. De Larrard, Concrete mixture proportioning - A scientific approach, E. S. London, Éd., London: Modern Concrete Technology Series, March 1999, p. 421.
- [58] F. De Larrard, «Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances,» Paris, 1988.
- [59] L. Nicoleau, «Interactions physico-chimiques entre le latex et les phases minérales constituant le ciment au cours de l'hydratation,» Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 2004.
- [60] S. Bethmont, «Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)- Etude expérimentale des interactions granulaires,» Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2008.
- [61] F. De Larrard, Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2002.
- [62] P.-C. Kreijger, «The skin of concrete – Composition and Properties,» *Materials and Structures*, vol. 17, n°1100, pp. 275-283, 1984.
- [63] S.-J. DeSouza, R.-D. Hooton et J.-A. Bickley, «A field test for evaluating high performance concrete covercrete quality,» *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 25, n°3, 1998.
- [64] A.-K. Crumbie, K.-L. Scrivner et . P.-L. Pratt, «The relationship between the porosity and permeability of the surface layer of concrete and ingress of aggressive ions,» chez *Materials research society symposium proceeding*, 1998.
- [65] *Directive n° 1999/13/CE du 11/03/99 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations.*
- [66] *Cahier de recommandations environnementales pour les acteurs de la construction et de l'aménagement*, 2006, pp. 21- 41.

- [67] C. Guyot, «Les chantiers à faibles nuisances,» Mairie de Paris, Paris, 2009.
- [68] G. Baty et R. Reynolds, «Release agents- how they work,» *Concrete International*, p. 52–54, 1997.
- [69] G. Lemaire, «Contribution à la maîtrise de la qualité des parements de béton,» Thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier, Toulouse, 2003.
- [70] D.-K. Owens et R.-C. Wendt, « Applied Polymer Sci,» *In: Jour*, vol. 13, p. 1741, 1969.
- [71] L.-R. Hernandez Ochoa, «Substitution de solvants et matières actives de synthèse par un combiné «solvant/actif » d'origine végétale,» Institut National Polytechnique, Toulouse, 2005.
- [72] L. Yuzhuo, «Microelectronic applications of chemical mechanical planarization,» *Wiley-Interscience*, p. 734 , 2008.
- [73] M. Yoshikiyo, *Micelles: theoretical and applied aspects*, vol. 14, New York: Plenum, 1992, pp. 603 - 604.
- [74] P. Coussot, H. Van Damme et C. Ancey, «Des solides coulants,» *Pour la science*, n°1273, Juillet 2000.
- [75] C. H. Leow, «Surface enhancements of concrete through use of controlled permeability formwork (CPF) liners,» chez *International Conference on Bridge Engineering & Hydraulic Structures*, Selangor, Malaysia, 26-28July, 2004.
- [76] D. Platel, «Impact de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physico-chimiques des coulis de ciment,» Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, 2005.
- [77] M.-H. Noel, «Ciment à Comportement Rhéologique Ajustable,» Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, 2009.
- [78] M. Bouteau, «Propriétés de mouillage de surfaces chimiquement hétérogènes,» Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, Paris, 2007.
- [79] M.-C. Michalski-Veillerot, «Adhésion des huiles et émulsions alimentaires aux surfaces de matériaux solides,» Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1998.
- [80] P. Bothorel, «Introduction à l'étude des emulsions, dans phénomènes d'interface, agents de surface,» *ed. T. J. Briant*, pp. 209-280, 1989.

-
- [81] C. Washington, «The electrokinetic properties of phospholipid stabilized fat emulsions VI. Zeta potentials of Intralipid 20% in TPN mixtures,» *Int J Pharm* , vol. 167, n°174, p. 87, 1992.
- [82] C. Washington, A. Chawla, N. Christy et S. Davis, «The electrokinetic properties of phospholipid-stabilized fat emulsions,» *Int J Pharm*, vol. 7, n°1191, p. 54, 1989.
- [83] A.-G.-B. Ritchie, «The Pressures Developed by Concrete on Formwork,» *Civil Engineering and Public Works Review*, vol. 57, n°1672, p. 10, 1962B.
- [84] N. J. Gardner, «Pressure of concrete against formwork,» *ACI journal*, Vol.177, n°31, pp. 279-286, 1980.
- [85] L.-E. Silbert, G.-S. Grest et G.-W. Landry, «Statistics of the contact network in frictional and frictionless granular packing,» *Phys. Rev*, vol. 66, n°1061303, pp. 1-9, 2002.
- [86] B. Cambou, P. Dubujet et C. Noguier, «Anisotropy in granular materials at different scales,» *Mechanics of Materials*, vol. 36, n°12, pp. 1185-1194, 2004.
- [87] M.-R. Rixom et N.-P. Mailvaganam, *Chemical admixtures for concrete*, Second edition éd., London: E.& F.N. Spon, Ed, 1986.
- [88] P. Coussot et J.-L. Grossiord, *Comprendre la rhéologie - De la circulation du sang à la prise du béton*, Paris: EDP Sciences, 2002.
- [89] L'adhérence du béton au coffrage, *Bulletin du ciment*, aout 1970.

Annexes

Annexe 1 : Superplastifiant GLENIUM 27



The Chemical Company

GLENIUM® 27



Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité

Description

Le GLENIUM® 27 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM®

Le GLENIUM® se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM® dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Domaines d'application

Le GLENIUM® 27 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le GLENIUM® 27 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Propriétés

L'excellent effet de dispersion du GLENIUM® 27 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le GLENIUM® 27 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton :

augmente

- la résistance à la compression à jeune âge et à long terme,
- la résistance à la flexion à jeune âge et à long terme,
- le module d'élasticité,
- l'adhérence sur les aciers,
- la résistance à la carbonatation,
- l'imperméabilité,
- la résistance aux agressions atmosphériques,
- la qualité des parements et de la texture du béton.

diminue

- la vibration,
- le retrait,
- le risque de fissuration,
- le fluage.

Caractéristiques

- | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| • Aspect | | liquide |
| • Couleur | | brun |
| • Masse volumique (MA 002) | 1,05 ± 0,02 g/cm ³ | |
| • pH (MA003) | | 7,0 ± 1 |
| • Teneur en chlorures (MA004) | | < 0,1 % |
| • Extrait sec | | 20 ± 2% |
| • Na ₂ O eq | | < 2 % |
| • Transport | | non classé |
| • Etiquetage | | pas de symbole exigé |



The Chemical Company

GLENIUM® 27

Mode d'emploi

Le GLENIUM® 27 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM® 27 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le GLENIUM® 27 dans l'eau de gâchage.
Éviter d'ajouter le GLENIUM® 27 sur les granulats.

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement.

Compatibilité

Le GLENIUM® 27 est compatible avec la majorité des ciments.

Le GLENIUM® 27 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC France pour toute synergie.

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,3 à 3,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 2,86 L pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC France.

Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 210 L, bidon de 10 L ou vrac.

Stockage

Stocker le GLENIUM® 27 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi

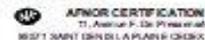
Le GLENIUM® 27 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

BASF Construction Chemicals France SAS a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie HDI Gerling France. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société d'assurances HDI Gerling Allemagne.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences BASF Construction Chemicals France.

Nos fiches de données de sécurité sont disponibles sur simple demande par Internet (www.basf-cc.fr) ou par téléphone (au 01 69 47 50 00).



AFNOR CERTIFICATION
11, Avenue F. de Pressat
93571 SAINT DENIS DE LA PLAINE CEDEX

FT-GLENIUM_27_V4 - Edition 05/2006 - Page 02

BASF Construction Chemicals France SAS

Z.I. Petite Montagne Sud - 10, rue des Cèvennes - Lisses - 91017 Evry Cedex
Tél. : 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 88 08 32 <http://www.basf-cc.fr>

Annexe 2 : Ciment CMI 52.5 N



CEM I 52,5 N CE CP2 NF

Domaines d'application

Les ciments CEM I 52,5 N CE CP2 NF sont principalement destinés aux travaux de Génie Civil ou d'ouvrages d'art.

Ces ciments s'adaptent parfaitement aux domaines suivants :

- Travaux en béton précontraint par pré ou post-tension non soumis à traitement thermique.
- Travaux en béton armé nécessitant des résistances finales élevées.
- **Béton prêt à l'emploi** : environnements - X0, XC, XD, XF1, XF2, XF3 - de la norme NF EN 206-1.



Barrage sur le Chot

Composition chimique du ciment (Valeurs moyennes en %)

Usines de production	clinker ≥ 95%			SO ₂	Classe CP2 5**	Na ₂ O Equivalent Actif
	C _A	C ₂ S	C ₃ S			
Airvault	7,3	67,2	8,8	3,5	0	1,11
Añorga	10,8	58,7	16,6	3,1	0,02	0,81
Beaucaire	8,9	68,5	11	3,5	0	0,39
Beffes	10,6	66,6	9,3	3,5	0	0,65
Bussac	8,2	74,8	3,7	3,4	0	0,21
Couvrot	10,9	65,5	13,4	3,5	0	0,80
Gargenville	7	68,6	10,5	2,8	0	0,52
Gaurain	8,5	69,9	8,3	3,3	0,02	0,70
Rombas	10,9	65,5	13,4	3,5	0,01	0,39
Villiers-au-Bouin	8,4	66,9	10,7	2,8	0	0,59
Valeurs garanties NF EN 197-1 marque CE et marque NF				≤ 4,5		
NF P 15-318 marque NF					< 0,2	

CEM I 52,5 N CE CP2 NF

Caracteristiques physiques (Valeurs moyennes)

Usines de production	Résistances mécaniques mortier CEN en MPa			Finesse		Eau pâte pure (%)	Début de prise
	1J	2J	28J	Blaine (cm ² /g)	Retus (%) ≥ 40µm		
Airvault	27	38	60	4230	4,1	31,9	3h50
Aforga	27	37	59	4480	-	31,8	2h20
Beaucaire	20	33	67	3590	-	28,4	2h20
Beffes	22	37	66	3840	-	31,6	3h40
Bussac	27	40	57	4360	0,3	32,8	2h30
Couvrot	24	39	62	3840	6,1	30,2	3h10
Gargenville	25	37	66	4100	6	27,8	2h50
Gaurain	25	38	63	4060	-	28,2	3h20
Rombas	25	37	63	4730	1,1	30,2	2h20
Villiers-au-Bouin	18	32	61	3590	-	27,9	2h40

Valeurs garanties
NF EN 197-1
marquage **CE**
et marque **NF**

≥ 18

≥ 50

≥ 1h00



Viaduc du Bec



Gare TGV - Vendôme

Caracteristiques complémentaires de la norme (Valeurs moyennes)

Usines de production	Tolte L	Chaleur d'hydratation à 41 h en J/g	Mantabilité mortier E/C : 0,50 en secondes	Début de prise sur mortier		
				Température 5°C	Température 20°C	Température 30°C
Airvault	56,7	370	8,8	-	-	-
Aforga	61,7	367	-	-	-	-
Beaucaire	58,3	374	3,1	6h00	3h20	1h50
Beffes	58,9	379	4,7	11h00	3h30	2h45
Bussac	58,8	385	3,3	-	-	-
Couvrot	64,3	367	4,2	-	-	-
Gargenville	59,7	346	4,3	9h50	4h00	2h25
Gaurain	63,4	376	-	-	-	-
Rombas	59,4	321	5,1	-	-	-
Villiers-au-Bouin	63	354	-	7h20	3h15	2h15

Règles de l'art

- Eviter le sous-dosage en ciment qui altère la durabilité des bétons.
- Limiter le rapport E/C qui contribue à la diminution des résistances et à l'augmentation de la porosité.
- Vérifier la compatibilité entre le ciment et les adjuvants utilisés (rhéologie, résistances).
- Ajuster la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité maximale sans ségrégation.
- Prendre toutes les dispositions pour éviter une dessiccation précoce par temps chaud ou par vent desséchant en procédant à une cure adaptée (paillason, eau pulvérisée, produit de cure, etc).



Centre aquatique - Tours

Ciments Calcia

Les Technodes - BP 01
78931 Guerville cedex
Tel : 01 34 77 78 00 - Fax : 01 34 77 79 06
www.ciments-calcia.fr - E-mail : info@ciments-calcia.fr

Juillet 2008

Annexe 3 : Fillers calcaires BETOCARB - MQ

Product information



Omya SAS
35 Quai André Citroën
F-75725 Paris Cedex 15
Tel +33 1 40 58 44 00
Fax +33 1 40 58 44 38
www.omya.com

Betocarb® - MQ

SITE: MARQUISE, France

DESCRIPTION DU PRODUIT: Addition calcaire pour bétons hydrauliques et filler pour bétons hydrauliques (EN 12620).

COMPOSITION TYPE DE LA ROCHE:

CaCO ₃	97,6	%
Carbonates totaux	99,3	%
Chlorures	0,001	%
Sulfates	0,002	%
Soufre total	0,024	%
Matières organiques	0,03	%
Essai au bleu de méthylène	0,7	g/kg
Alcalins équivalents	0,04	%
Silice totale	0,4	%
Réactivité aux alcalins	NR	

CARACTERISTIQUES TYPES DU PRODUIT:

Granulométrie:		
- Particules < 2 mm	100	%
- Particules < 0,125 mm	99,9	%
- Particules < 0,063 mm	96	%
Surface spécifique Blaine	591	m ² /kg
Coefficient de variation de Blaine	8,1	%
Indice d'activité à 28 jours	0,79	
Taux d'humidité départ usine	0,2	%

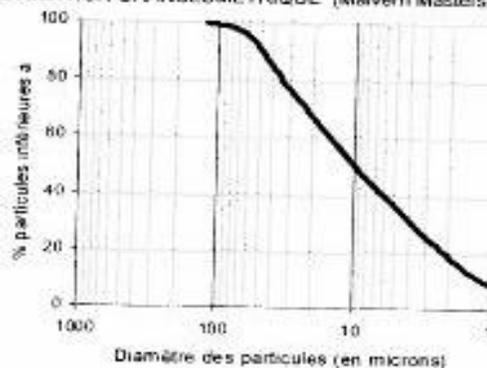
CARACTERISTIQUES GENERALES DU PRODUIT:

Densité	2,7	g/ml
Densité apparente tassée	1,3	g/ml

APPLICATIONS PRINCIPALES:

Produits en béton
- Pavés
- Blocs
- Autres produits
Béton prêt à l'emploi
Eléments préfabriqués

REPARTITION GRANULOMETRIQUE (Malvern Mastersizer 2000).



CONDITIONNEMENT STANDARD

- VRAC
- SAC (papier) de 25 kg sur palette

Les informations contenues dans cette fiche technique ne concernent que le matériel spécifique mentionné et ne concernent pas l'utilisation conjointement avec tout autre matériel ou dans tout procédé. Les informations fournies dans le présent document ne basent sur des données techniques qui, à la connaissance de Omya, sont fiables, exactes. Toutefois, Omya ne fournit aucune garantie de complétude ou d'exactitude de ces informations, et Omya n'assume aucune responsabilité résultant de leur utilisation ou vice-versa de toutes réclamations, pertes ou dommages avertis par une tierce partie. Toute personne recevant ces informations doit exercer son jugement propre en ce qui concerne leur utilisation appropriée et il incombe à l'utilisateur d'évaluer si le matériel convient (y compris en matière de sécurité) pour un usage particulier avant d'en faire usage.

édition : 12/06/2009
CORP-FR-BETOCARB - F1M0
1100117_00_1
version : 000

Annexe 4 : Huile végétale (Eco2)



CHRYSO® Dem Eco 2

Démoulage différé
Pur Végétal



Descriptif

CHRYSO® Dem Eco 2 est un agent de démoulage différé prêt à l'emploi, pur végétal. Il ne présente ainsi aucun risque pour les utilisateurs.

CHRYSO® Dem Eco 2 est élaboré sans solvant à partir de nouvelles matières premières végétales, brevetées par CHRYSO.

CHRYSO® Dem Eco 2 respecte l'environnement.

CHRYSO® Dem Eco 2 laisse à la surface de toute partie métallique un film gras qui permet un glissement facile du béton.

CHRYSO® Dem Eco 2 est recommandé lorsqu'on recherche une surface sans bullage.

CHRYSO® Dem Eco 2 donne à la surface du béton un aspect glacé, brillant et sans marbrure.

CHRYSO® Dem Eco 2 est particulièrement recommandé pour le démoulage des bétons architectoniques.

Caractéristiques

- Nature : liquide
- Couleur : jaune
- Densité : < 1
- Viscosité cinématique à 20 °C : 60 ± 5 mm²/s (cst)
- Point éclair : > 100 °C
- Biodégradabilité : > 60 % à 28 jours selon NF EN ISO 9408 - OCDE 301 F

Classification Synad Produits de Démoulage

Environnement	★★★★
Santé	★★★★
Sécurité Feu	★★★★
Très bon ▲▲▲▲ Très mauvais ○○○○	

Conditionnement

- Vrac
- Tonnelets de 60 L
- Fûts de 215 L
- Vartainers de 1000 L

Conformité

Conformité de la teneur en PCB à la législation en vigueur (Directives du Conseil des Communautés Européennes n° 85/467/CEE du 1^{er} octobre 1985-J.O. des Communautés Européennes L269 du 11 octobre 1985).

Application

Domaines d'application

- Toutes surfaces métalliques en contact avec le ciment, béton ou mortier
- Moules métalliques
- Moules bois
- Moules plastiques

Mode d'emploi

La consommation de CHRYSO® Dem Eco 2 dépend de la nature du coffrage et du procédé d'application.

CHRYSO® Dem Eco 2 doit être appliqué par pulvérisation, au pinceau ou au rouleau.

CHRYSO® Dem Eco 2 ne doit pas être appliqué sous une température inférieure à 10°C, sans test préalable.

Pour des supports spéciaux (type synthétique ou PU) ou des applications avec du ciment blanc. Il est recommandé d'effectuer un test de compatibilité avant toute utilisation particulière.

Matériel

- Type de buse recommandé : TP 11015
- Pression : 3 bars
- Couleur de buse : marron

Précautions

- La consultation des fiches de données de sécurité est nécessaire avant tout démarrage d'installation de dépose d'huile.
- Stocker le produit dans un endroit tempéré.
- Durée de vie : 24 mois.



2.2-37

CHRYSO® Dem Eco 2

Démoulage différé
Pur Végétal



Sécurité

CHRYSO® Dem Eco 2 est un produit "sans danger". Le port d'équipements de protection individuelle est recommandé.
Pour plus d'informations, consulter la fiche de données de sécurité sur le site internet www.chryso.com.

Les informations contenues dans la présente notice sont l'expression de nos connaissances et de résultats d'essais effectués dans un souci constant d'objectivité. Elles ne peuvent cependant, en aucun cas, être considérées comme apportant une garantie ni comme engageant notre responsabilité en cas d'application défectueuse. Des essais préalables à chaque utilisation permettront de vérifier que les modes d'emploi et les conditions d'application du produit sont satisfaisants. Nos spécialistes sont à la disposition des utilisateurs pour les aider à résoudre au mieux leurs problèmes.

« Se renseigner sur la dernière mise à jour »

Dernière modification : 04/07

CHRYSO : 19, place de la Résistance - 92446 Issy les Moulineaux cedex France - Tél. : 01 41 17 18 19 - Fax : 01 41 17 18 80



Annexe 5 : Huile minérale (Oleo50)



2.2-7

CHRYSO®Dem Oleo 50

Démoulage différé
Pur Synthèse

Descriptif

CHRYSO®Dem Oleo 50 est un agent de démoulage différé prêt-à-l'emploi qui, pulvérisé à la surface d'un moule métallique, en plastique ou en bois, assure un décoffrage de tous bétons démoulés après durcissement du ciment.

Tout en apportant une amélioration de l'aspect du parement du béton, CHRYSO®Dem Oleo 50 permet l'application future d'enduit et de peinture selon les conditions définies par les règles de l'art de l'application des revêtements.

Caractéristiques

- Nature : liquide
- Couleur : jaune
- Point éclair : > 100 °C
- Densité : < 1
- Viscosité cinématique à 20° C : 24,5 ± 2,5 mm²/s (cst)

Classification Synad Produits de Démoulage

Environnement	☹☹☹☹☹
Santé	☹☹☹☹☹
Sécurité Feu	☹☹☹☹☹
This box ☹☹☹☹☹ This machine ☹☹☹☹☹	

Conditionnement

Vrac
Fûts de 215 L
Tonnelets de 60 L

Conformité

Conformité de la teneur en PCB à la législation en vigueur (Directives du Conseil des Communautés Européennes n° 85/467/CEE du 1^{er} octobre 1985-J.O. des Communautés Européennes L269 du 11 octobre 1985).

Applications

Domaines d'application

- Préfabrication lourde.
- Tous démoulaques différés de béton y compris ceux soumis à étuvage jusqu'à 80° C.
- Bétons banchés traditionnels.

Mode d'emploi

Consommation :
 + moule métallique ou plastique : 50 m²/l,
 + coffrage bois : 30 m²/l.

CHRYSO®Dem Oleo 50 doit être appliqué par pulvérisation (tous types d'appareils) sous forme de film régulier, sans manque ni surcharge.

Pour des supports spéciaux ou des applications avec du ciment blanc, il est recommandé d'effectuer un test de compatibilité avant toute utilisation particulière.

Matériel

Type de buse recommandé : TP 80015
 Pression : 3 bars
 Couleur de buse : verte

Précautions

- En cas de gel et prise en masse, dégeler et homogénéiser à nouveau avant utilisation.
- Durée de vie : 24 mois.



2.2-7

CHRYSO®Dem Oleo 50

Démoulage différé
Pur Synthèse

SECURITE

CHRYSO®Dem Oleo 50 est un produit « sans danger ». Le port d'équipements de protection individuelle est recommandé.

Pour plus d'informations, consulter la fiche de données de sécurité sur le site Internet www.chryso-online.com.

Les informations contenues dans la présente notice sont l'expression de nos connaissances et de résultats d'essais effectués dans un souci constant d'objectivité. Elles ne peuvent cependant, en aucun cas, être considérées comme apportant une garantie ni comme engageant notre responsabilité en cas d'application déficiente. Des essais préalables à chaque utilisation permettront de vérifier que les modes d'emploi et les conditions d'application du produit sont satisfaisants. Nos spécialistes sont à la disposition des utilisateurs pour les aider à résoudre au mieux leurs problèmes.

« Se renseigner sur la dernière mise à jour »

Dernière modification : 02/06

CHRYSO : 19, place de la Résistance - 92446 Issy les Moulineaux cedex France - Tél. : 01 41 17 18 19 - Fax : 01 41 17 18 80



Annexe 6 : Pulvérisateur – Ecospray

Pulvérisateur Eco Spray

Pulvérisateur rechargeable

SOINS DU VISAGE ET DU CORPS
FACE AND BODY CARE

SOINS DES CHEVEUX
HAIR CARE

LOTION
LOTION

HUILES
OILS

EAUX
WATERS

PARFUM
PERFUME

LAQUE
LACQUER

REACTIF
REAGENT

DEODORANT
DEODORANT

DESINFECTANT
DISINFECTANT

HYGIENE
HYGIENE

SANTE
HEALTH

BEAUTE
BEAUTY CARE

**Mieux qu'un pulvérisateur
Plus qu'un aérosol**

L'ECOSPRAY est un micro-diffuseur à réserve de pression qui pulvérise sur mesure les fluides de votre choix plus ou moins finement selon vos exigences. Spécialement conçu pour les fluides et les crèmes liquides nécessitant une parfaite qualité de pulvérisation.

Une utilisation très simple

Fixez la réserve de pression sur le corps de l'ECOSPRAY, puis le flacon préalablement rempli de la solution de votre choix. Appuyez sur le bouton pour diffuser une brume de solution uniformément répartie. Il est possible de l'incliner à plus de 45° pour pulvériser sur une zone horizontale sans perte de qualité, un grand avantage lorsqu'on doit traiter une personne allongée.

Sûr - sans danger - écologique

La réserve de pression ECOSPRAY est un petit contenant en aluminium monobloc contenant le propulseur (Sans effet nocif pour l'environnement) **Non inflammable - Inexplosible - Non toxique - Inodore.**

Pratique et Réglable

Rechargeable : Changez la réserve de pression et ou le récipient de produit.

Réglable : Par changement du gicleur.

Autonome : sans fil, ni moteur, longue autonomie (**440ml avec une seule réserve de pression**)

Économique

Le coût des services est inférieur de 50% à celui d'un aérosol :

- Économie des produits pulvérisés ;
- Économie des emballages et boîtes ;
- Économie de propulseur : à service égal, par rapport aux aérosols, Ecospray consomme jusqu'à 20 fois moins de propulseur.

Produits utilisables

Pulvérisez à votre choix des liquides aqueux, huileux ou alcooliques :
Laque, fixateur, brillantine, parfum, cologne, déodorant, after-shave, produits capillaires, eaux, lotion, émulsion, antiseptique, produits de traitement, de pénétration, huiles, camphre, traitement par osmose, soins dermatologique.



Caractéristiques techniques

Ecospray
L x l x H : 105 x 50 x 130 mm
Poids (vide) : 190 grammes
Garanti à vie

Flacon en PETG
Capacité maximale 125 ml

Réserve de pression en aluminium monobloc (Résiste à une pression interne de 18 bars)
Capacité de propulsion : 440 ml

Pulvérisateur avec une recharge



Réf. BH500
Prix CHF H.T.
59.00



Réf. BH501
Prix CHF H.T.
25.00

Vous n'imaginez pas tout ce que vous pouvez faire avec Ecospray



MED EQUIPEMENT SA, Prê Bouvier 3 - 12117 Meyrin Tél. 022 782 18 17 Fax 022 782 18 81 www.med-equipement.ch