



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
Et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar D'El-Oued

Faculté de technologie

Département Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Préparé en vue de l'obtention du diplôme du

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : sciences et technologie

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

Thème

**ETUDE RHEOLOGIQUE DES BETONS FLUIDES
(ETUDE THEORIQUE)**

Préparé par :

BENYAMMA Amor

GHENBZIA Mohammed Larbi

BENALI Larbi

Devant le jury compose de :

Président : D^r. FARIK Ali

M.C.B Université D'El-Oued

Examinatrice : D^r. SOULIMANE Ilyes

M.C.B Université D'El-Oued

Promotrice : D^r. LABIODH Bachir

M.C.B Université D'El-Oued

Promotion : juin 2021

DEDICACES

EN CET HONORABLE LIEU, D'UN SIMPLE GESTE TRACE PAR ECRIT, MAIS QUI JAILLIE
DU PROFOND SENTIMENT DE RECONNAISSANCE, PERMETTEZ-NOUS DE CITER LES
NOMS COMME UN MEMORANDUM POUR CEUX QUI ONT UNE PLACE PARTICULIER

A NOS TRES CHERS PERES

A NOS TRES CHERES MERES

A NOS FRERES ET SŒURS

A TOUS NOS COUSINS SANS EXCEPTION A TOUTE NOS FAMILLES.

A TOUS NOS AMI(E) S SANS EXCEPTION.

A TOUS ; NOUS DEDIE CET OUVRAGE, QUI EST LE SENS DE NOS ETUDES SUPERIEURS,
TEL UN PRESENT DU CŒUR, EN PRIANT ALLAH TOUT PUISSANT A LE METTRE AU
SERVICE DE NOTRE NATION ET DU BIEN DE L'HUMANITE, ET QU'IL SERA UNE
LUMIERE SUR NOUS PARCOUR PROFESSIONNEL

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, on remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la Santé et la patience qu'il nous donné durant tous ces années d'étude.

Nous tenons à remercier vivement aussi notre encadreur Monsieur **LABIODH Bachir** pour son aide, ses précieux conseils et son soutien tout au long de notre formation, et aussi plus particulièrement pour sa patience, ses encouragements et sa direction vigilante de notre travail de recherche

Nous exprimons également notre gratitude aux enseignants du département Genie Civil .

Nous tenons à remercier également d'avance, les professeurs de jury, qui vont examiner cet humble travail afin de l'enrichir de leurs précieux conseils et corrections.

Notre profond remerciement pour nos familles pour leurs patiences et nos collègues pour leurs encouragements.

Un grand merci pour ceux et celles qui nous ont aidé de près ou de loin toute la durée de notre parcours éducatif.

الوقت الذي تبقى فيه الخرسانة الطازجة غير مهمة مقارنة بعمرها الإجمالي

الخلط، النقل، وضعها في مكان المخصص، عملية الاهتزاز ... الخ. ومع ذلك أثناء هذه المدة القصيرة تحدث عدة عمليات

تؤثر هذه العمليات بشكل خاص على السلوك الريولوجي للخرسانة، في الواقع على معظم صفات الهيكل: درجة الضغط والقوة

المقاومة للخرسانة في الهيكل نفسه وتماسكها مما يؤدي إلى انخفاض خطر التفكك والمظهر في الواجهات الخ.

وبالتالي فإن دراسة سلوك الريولوجي للخرسانة لها أهمية صناعية كبيرة جدا.

RÉSUMÉ

Le temps pendant lequel le béton reste frais est insignifiant par rapport à sa durée de vie totale. Pourtant, au cours de ce temps, beaucoup d'opérations s'effectuent : malaxage, transport, mise en place, serrage, etc. Ces opérations, dépendant notamment du comportement rhéologique des bétons, influencent en fait la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, cohésion du béton entraînant un moindre risque ségrégation, apparence des parements, étanchéité, etc. Ainsi, l'étude du comportement rhéologique des bétons présente un grand intérêt industriel

ABSTRACT

The time during which the concrete stays fresh is insignificant compared to its total lifespan. However, during this time, many operations are carried out mixing, transport, installation, tightening, etc. These operations, depending in particular on the rheological behavior of the concrete, in fact influence most of the qualities of the structure: compactness and real strength of the concrete in the structure itself, cohesion of the concrete resulting in a lower risk of disintegration, appearance of the facings, sealing, etc. Thus, the study of the rheological behavior of concrete is of great industrial interest.

DEDICACES	
REMERCIEMENTS	
RESUME	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
NOTATION	
INTRODUCTION	01

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction	03
I.2 Histoire Du Béton	03
I.3 Definition	04
I.4 Constituants Des Matériaux Cimentaires	05
I.4.1 Ciments	05
I.4.1.1 Composition Chimique et Minéralogique	05
I.4.1.2 Hydratation Du Ciment	07
I.4.1.3 Classification des ciments	09
I.4.2 L'eau de gâchage (NF EN 1008)	10
I.4.3 Les Granulats (XP P 18-540)	10
I.5 Les Bétons Ordinaires (BO)	10
I.5.1 Définition Du Béton Ordinaire	10
I.5.2 La Composition Du Béton Ordinaire	11
I.5.2.1 Le Ciment	11
I.5.2.2 Les Granulats	11
I.5.2.3 Rapport Ciment-Eau	11
I.5.2.4 Rapport Granulat-Sable	11
I.5.3 Formulation Du Béton Ordinaire	11
I.6 Les Bétons A Hautes Performances BHP	12
I.6.1 Définition Du Béton A Haute Performance	12
I.6.2 Spécifications Sur Les Constituants Du Béton A Haute Performance	12
I.6.2.1 Ciments	12
I.6.2.2 Granulats	12

SOMMAIRE

I.6.2.3 Additions	13
I.6.2.4 Adjuvants	13
I.6.3 Formulation Du Béton A Haute Performance	13
I.6.4 Propriétés Physico-Chimiques Et Mécaniques Des Bétons A Haute Performances	13
I.6.4.1 Résistances mécaniques	13
I.7 Les Bétons Projetés	13
I.7.1 Domaines D'application	14
I.7.2 Avantages Et Inconvénients Des Bétons Projetés	14
I.7.3 Techniques De Projection	15
I.7.3.1 Voie Sèche	15
I.7.3.2 Avantages Et Inconvénients De La Projection Par Voie Sèche	15
I.7.3.3 Voie Mouillée	15
I.7.3.4 Avantages Et Inconvénients De La Projection Par Voie Mouillée	16
I.7.5 Composants Du Béton Projeté	16
I.7.5.1 Ciment	16
I.7.5.2 Granulats	16
I.7.5.3 Sable	17
I.7.5.4 Eau	17
I.7.6 Formulation Des Bétons Projetés	17
I.7.6.1 Passage Dans La Machine	18
I.7.6.2 Arrangement Du Béton Sur Le Support	18
I.8 Les Bétons Autoplacants	20
I.8.1 Définition	20
I.8.2 Classification Des BAP	20
I.8.3 Concept Du Béton Auto Plaçant:	21
I.8.4 Domaines D'utilisation Privilégiés Des BAP	22
I.8.5 Constituant Du Béton Autoplaçant	23
I.8.5.1 Ciment	23
I.8.5.2 Granulats	25
I.8.5.3 Sable	27
I.8.5.4 Eau	28
I.9 Les Fibres	29
I.9.1 Définition De Béton De Fibres	29

SOMMAIRE

I.9.2.2 Différents Types De Fibres	31
I.9.3 : Critère De Choix Du Type De Fibres	34
I.9.4 Rôle Des Fibres	35

CHAPITRE II : RHEOLOGIE GENERALE

II.1 Définition De La Rhéologie	36
II.2 Equations Générales	37
II.3 État fluide versus état solide	38
II.4 Lois Fondamentales Et Propriétés Rhéologiques	39
II.4.1 Loi De Hooke Et Elasticité	39
II.4.2 Loi de Newton et viscosité	40
II.4.3 Plasticité et Seuil de Contrainte	42
II.5 Comportements Rhéologiques Classiques	43
II.5.1 Déformation Différée	43
II.5.2 Relaxation	44
II.5.3 Recouvrement	44
II.5.4 Hystérésis	44
II.5.5 Écrouissage	45
II.5.6 Thixotropie et rhéopexie	45
II.6 Méthodes De Caractérisation Rhéologique	46

CHAPITRE III : LES ESSAIS RHEOLOGIQUES EXISTANTS

III.1 Quelques essais rhéologiques existants	47
III.2 Essais Empiriques Pour Béton	47
III.2.1 Essai D'étalement Au Cône D'abrams	47
III.2.2 Essai D'étalement (Slump Flow)	49
III.2.3 Essai L'appareil V.B	50
III.2.4 Essai de la Table a Secousses	51
III.2.5 Essai Le Maniabilimètre L.C.L	42
III.2.6 Essai au Le wattmètre	53
III.2.7 Essai L'Orimet test	53
III.2.8 Essai de boîte en L (L- box test)	54
III.2.9 Essai De Stabilité Au Tamis	55
III.3 Essais Viscosimètres à cylindres coaxiaux	56

SOMMAIRE

III.3.1 Bases théoriques	56
III.3.2 Mesure en Contrainte Tangentielle – Cisaillement	59
III.3.3 Choix du rhéomètre en fonction de l'application	60
III.4 Essais Sonde Viscoprobe	62
 CHAPITRE IV : RHEOLOGIE DE LA PATE DE CIMENT ET DU BETON	
IV.1 Pâte De Ciment, Béton Ordinaire Et Béton Fluide	63
IV.2 Rhéologique De Béton	65
IV.2.1 Approche Modifiée Par Papanastasiou	67
IV.2.2 Paramètres Influant Sur La Rhéologie Du Béton Frais	69
IV.2.2.1 Compositions Du Béton	69
IV.3 Différents Modèles Rhéologiques	73
IV.3.1 Rhéologie Des Bétons Modernes	73
IV.3.1.1 Comportement Rhéologique Des Fluides	73
IV.3.1.2 Interaction C3A-Plastifiant	74
IV.3.1.3 Les Sulfates Alcalins	75
IV.3.1.4 Rôle Des Superplastants	75
IV.4 Modelé De Bingham	75
IV.5 Quelques Résultats D'essais Rhéologiques Des Différent Type De Béton (46)	77
CONCLUSION GENERAL	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	85

LISTE DE FIGURES

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Composition d'un béton	04
Figure I.2 : MEB ; les minéraux principaux du clinker	06
Figure I.3 : C-S-H externe cristallisé par précipitation Cristaux [8] de portlandite Ca(OH)_2 .	08
Figure. I.4: image en microscopie électronique à balayage de cristaux d'étringite	08
Figure. I.5 Procédé de projection par voie sèche	15
Figure I.6 Procédé de projection par voie mouillée	16
Figure I.7 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	22
Figure I.8 : la poudre du ciment portland	24
Figure I.9 : Ciments utilisés dans la confection des bétons autoplaçant	25
Figure I.10 : Choix de la granularité pour un BAP 0–16	26
Figure I.11 : Modèle de composite à base des fibres	30
Figure I.12 : Rôle des fibres dans la matrice de béton	30
Figure I.13 Différentes formes géométriques de fibre métallique	34
Figure I.14 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres	35

CHAPITRE II : RHEOLOGIE GENERALE

Figure II.1 : courbes de charge et de décharge d'un corps élastique : (a) élasticité parfaite ; (b) élasticité imparfaite [21]	40
Figure II.2 : Réponses instantanées des fluides à une contrainte appliquée : a. fluide rhéofluidifiant ; b. fluide newtonien ; et c. fluide rhéoépaississant	41
Figure II.3 : Réponses d'un matériau aux compressions uniaxiales [21] réalisées avec la vitesse de compression croissante	41
Figure II.4 : Réponses des matériaux idéaux à une vitesse de [14] déformation constante	43
Figure II.5 : Comportement de déformation différée (retardée)	43
Figure II.6 : Comportement de relaxation	44

LISTE DE FIGURES

Figure II.7 : Comportements des recouvrements instantanés et diffère	44
Figure II.8 : Comportement d'hystérésis	45
CHAPITRE III : LES ESSAIS RHEOLOGIQUES EXISTANTS	
Figure III.1 Le cône d'Abrams	47
Figure III.2 Le cône d'Abrams	48
Figure III.3 Schéma de principe de l'essai d'étalement	49
Figure III.4 Essai d'étalement au cône d'Abrams	49
Figure III.5 Essai d'étalement	50
Figure III.6 L'appareil V.B [34]	51
Figure III.7 table à secousses	52
Figure III.8 Le maniabilimètre L.C.L	53
Figure III.9 Essai de la boîte en L (dimensions)	54
Figure III.10 : Essai de la boîte en L	54
Figure III.11 L'essai de stabilité au tamis	55
Figure III.12 L'essai de stabilité au tamis	55
Figure III.13 L'essai viscosimètre	56
Figure III.14 Relation entre vitesse angulaire et couple exercé dans un viscosimètre pour un corps binghamien	58
Figure III.15 Géométries des rhéomètres rotatifs : (a) cylindre-cylindre (cylindres coaxiaux) ; (b) cône - plateau ; (c) plateau-plateau 5	59
Figure III.16 La trajectoire de la sonde Viscoprobe dans le malaxeur (a) ; la sonde Viscoprobe (b)	62
Figure III.17 Chaîne de mesure de la sonde Viscoprobe	63
Figure III.18 Logiciel d'analyse des résultats rhéologiques de la sonde Viscoprobe	64
Figure III.19 Schéma explicatif pour le calcul de la vitesse de la sonde dans le malaxeur	65
Figure III.20 Vérification du dispositif de mesure par un calibrage de la sonde Viscoprobe	66

LISTE DE FIGURES

(a) ; Courbe de calibrage : forces dans le sens de l'avancement de la sonde (force positive) et dans le sens contraire l'avancement de la sonde (force négative) (b)

CHAPITRE IV : RHEOLOGIE DE LA PATE DE CIMENT ET DU BETON

Figure IV.1 a) Contrainte de cisaillement et b) Viscosité apparente vs taux de cisaillement pour différents modèles classiques avec différents paramètres : $T_0 = 5$, $\mu = 0.5$, $n = 0.75$ et $K=2$:	71
Figure IV.2 Modèle de Bingham-Papanastasiou pour différentes valeurs de m Avec : $T_0 = 5$ et $\mu = 0.5$	72
Figure IV.3 Modèle de Casson-Papanastasiou pour différentes valeurs de m avec : $T_0 = 5$ et $\mu = 0.5$	73
Figure IV.4 Modèle de Herschel Bulkley-Papanastasiou pour différentes valeurs de m avec $T_0 = 5$, $n = 0.75$ et $K=2$	73
Figure IV.5 Présentation des rheographes seuil de cisaillement vs viscosité des pâtes de ciment, mortiers et bétons : avec l'ajout de SP (gauche) et effet de la forme des granulats et la quantité de sable (droite) [47].	73
Figure IV.6 a) Effet du rapport E/C sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons frais. b) Effet de l'eau, l'air et le plastifiant sur le seuil et la viscosité des mortiers [47]	74
Figure IV.7 Influence du type de malaxeur sur la rhéologie de béton [47]	75
Figure IV.8 Viscosité plastique en fonction du taux de pré-cisaillement pour différentes techniques de mélange (David A. Williams, 1998).	76
Figure IV.9 Comparaison des seuils d'écoulement (a) et de la viscosité (b) mesurées avec différents types de rhéomètres (Banfill, 2006)	76
Figure IV.10 différents Comportements	78
Figure IV.11 Comportement d'un fluide non newtonien avec seuil selon la loi de Bingham Papanastasiou selon différentes valeurs de m : (a) linéaire et (b) logarithmique	80
Figure IV.12 Rhéogrammes des pâtes cimentaires à base de fines de pouzzolane à différents dosages de superplastifiants	81
Figure IV.13 Rhéogrammes des pâtes cimentaires à base de fines de laitier à différents	82

LISTE DE FIGURES

dosages de superplastifiants

Figure IV.14 Rhéogrammes des pâtes cimentaires à base de fines de tuf à différents dosages de superplastifiants 82

Figure IV.15 Aspect macroscopique des BAP (répartition des granulats dans une pâte optimisée) 83

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : Composition minéralogique de clinker	05
Tableau I.2 : Composition chimique de clinker	06
Tableau I.3 : Résistance à la compression des ciments	09
Tableau I.4 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisée	33

CHAPITRE III : LES ESSAIS RHEOLOGIQUES EXISTANTS

Tableau III.1 Le tableau l'influence de la géométrie du dispositif sur la mesure	61
---	----

CHAPITRE IV : RHEOLOGIE DE LA PATE DE CIMENT ET DU BETON

Tableau IV.1 : Paramètres du béton frais selon le modèle de Bingham et le modèle de Herschel Buckley (μ^* Viscosité plastique équivalent) [49]	70
Tableau IV.2 : Modèles rhéologiques	78

Notation

BHP: Béton Haute Performance

E/C: Rapport Eau / Ciment

CSH: Silicate De Calcium Hydraté

T : La Contrainte De Cisaillement (Pa)

T_0 : Le Seuil De Cisaillement (Pa)

η : La Viscosité Apparente (Pa.s)

μ : La Viscosité Plastique (Pa.s)

$\dot{\gamma}$: Le Taux De Cisaillement (s^{-1}).

SP : Super Plastifiants

SF : Fumées De Silice

BAP : Béton Autoplaçants

BO : Béton Ordinaire

σ_p : Contrainte Plastique Pa

$\dot{\gamma}$: Vitesse De Cisaillement s^{-1}

η : Viscosité Pa.s

η : Viscosité Pour Un Taux De Cisaillement Nul Du Modèle De Cross Pa.s

η : Asymptote De Viscosité Pour Un Taux De Cisaillement Très Elevé Du Modèle De Cross Pa.s

r : Rayon du tube du viscosimètre m

r_0 : Rayon initial de l'échantillon m

Les bétons traditionnels dit bétons vibrés sont constitués d'un mélange de ciment (le liant hydraulique), de sable, de gravillons et d'eau. Les granulats sont classés en fonction de leur taille : fins (sable) et gros (gravillons). Ils constituent le squelette granulaire du béton et participent à sa résistance.

Ces types de bétons sont maintenant bien maîtrisés en termes de formulations et de performances par les opérateurs. Cependant, ces bétons, traditionnellement fermes, nécessitent d'être vibrés pour être coulés dans les coffrages à géométries complexes. Ils posent donc des difficultés de mise en place pour les ouvriers, en particulier dans les zones de fort encombrement par des armatures. Ceci a motivé le développement de nouveaux bétons qui ont un comportement fluide.

Malgré toute son importance, l'étude du comportement rhéologique des bétons est peu avancée aujourd'hui ; cela est dû en grande partie à la complexité de ce matériau, qui présente une forte hétérogénéité. La caractérisation rhéologique des bétons frais reste donc toujours au niveau empirique. Avec l'apparition des nouveaux bétons fluides, l'insuffisance des moyens existants pour caractériser les bétons frais devient manifeste. De nouvelles caractérisations adéquates sont donc fortement demandées.

Notre manuscrit est structuré en quatre chapitres principaux qui suivent l'ordre chronologique de notre travail, et qui sont décrits comme suit :

Le premier chapitre introduit une synthèse bibliographique générale sur l'Historique du matériau béton, on définit les bétons ordinaires, les bétons à haute performance, béton Autoplaçant, le béton projeté et le béton fibre. On présente aussi la formulation des bétons et les paramètres qui influent sur cette formulation, les propriétés mécaniques et les propriétés physiques des bétons sont également exposés.

Dans le deuxième chapitre on donne la définition traditionnelle de la rhéologie qui est très proche de celle de la mécanique du milieu continu, la rhéologie est une science qui traite des propriétés mécaniques de produits variés : solide, liquide et intermédiaires. L'approche macroscopique nous permet d'établir les relations entre les forces appliquées et les effets géométriques engendrés par ces forces à grande échelle. La forme mathématique de ces relations et l'équation rhéologique d'état ou l'équation constitutive seront présentées.

INTRODUCTION

Le troisième chapitre traite des essais de caractérisation rhéologique existants recommandés pour vérifier les propriétés des bétons à l'état frais ainsi que les particularités de ces constituants sont rappelées, ces essais seront exposés des plus empiriques aux plus sophistiquées.

Pour finir, dans le quatrième chapitre nous présentons les principaux résultats des essais rhéologiques réalisés par des recherches antérieurs, qui ont été faites sur différents types des bétons fluides, les interprétations de ces résultats sont traitées d'une manière la plus correcte possible afin d'optimiser des principaux paramètres rhéologiques tels que la contrainte de cisaillement, la viscosité plastique.

Enfin, les principales conclusions concernant ce travail sont présentées dans la partie conclusion générale de ce manuscrit.

CHAPITRE 1 : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes.

Il est constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte (ciment, d'eau et éventuellement d'ajouts).

Les granulats sont des matériaux inertes qui, agglomérés par un liant, constituent le squelette du béton, lui confèrent sa compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent les variations volumiques lors du durcissement.

La pâte de ciment est le siège des réactions d'hydratation des constituants qui conduisent aux processus de prise et de durcissement et la transforment en matrice liante.

Les adjuvants fournissent aux formulations de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voire même lui conférer des propriétés nouvelles.

I.2 Histoire Du Béton

Les Romains de l'Antiquité savaient faire du béton. Ils avaient découvert que, pour fabriquer un liant hydraulique qui fasse prise sous l'eau, il fallait mélanger à de la chaux des déchets de fabrication des tuiles et des briques ou des cendres volcaniques (provenant notamment de Pozzuoli, dans la baie de Naples, qui donna son nom à la pouzzolane, roche volcanique).

Cette connaissance leur a, par exemple, permis de construire des ports protégés par des jetées en béton qui faisait prise sous l'eau, contrairement à la chaux (Vitruve, De l'architecture). Leur savoir s'est ensuite perdu au Moyen Âge. C'est la mise au point et le développement de la production des ciments artificiels modernes qui a permis l'essor de la construction actuelle en béton.

Aux barques en béton (1848) de Joseph-Louis Lambot (1814-1887) et aux caisses à fleurs (1849) de Joseph Monier (1823-1906) succèdent les réalisations d'entrepreneurs qui développent des « systèmes » de béton armé : François Coignet (1814-1888), qui met au point le béton aggloméré ; Monier, dont les brevets de 1877 et 1878 seront exploités en Allemagne ; François Hennebique (1842-1921), dont la société construira plus de 7 000 ouvrages, parmi lesquels le siège de cette dernière au 1, rue Danton (1900) à Paris et la villa de l'architecte à Bourg-la-Reine (1903) sont des exemples encore existants ; Armand Considère (1841-1914), qui invente le béton fretté (1901)... En 1906, cette première phase prend fin avec la publication des Instructions relatives à l'emploi du béton

armé, véritable premier règlement français de calcul des structures en béton armé. Au siècle, c'est l'invention du béton précontraint par Eugène Freyssinet (1879-1962) qui ouvrira de nouveaux horizons au matériau béton. La précontrainte, qui consiste à garder le béton dans un état comprimé grâce à des câbles en acier tendus, permet d'atteindre de grandes portées avec du béton et a trouvé, notamment, son application dans les ponts. Depuis lors, les progrès dans les sciences des matériaux ont permis d'améliorer encore de manière spectaculaire les propriétés des bétons. [4]

I.3 Définition

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton [5]. Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- ✓ d'une pâte pure (ciment + eau),
- ✓ d'un mélange granulaire,
- ✓ de produits additionnels (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- ✓ de matrice ou de mortier : le mélange (liant + sable + eau)
- ✓ de squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats

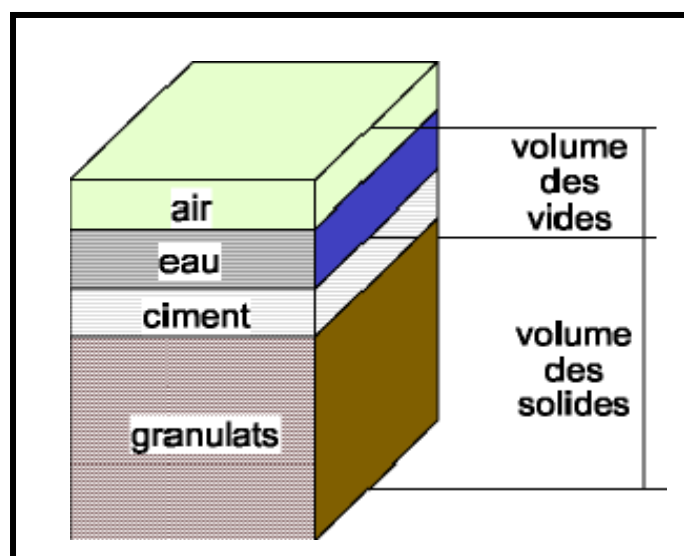


Figure I.1 : Composition d'un béton.

I.4 Constituants Des Matériaux Cimentaires

Les caractéristiques physico-mécaniques du béton à l'état frais et à l'état durci dépendent de sa composition et des différentes actions mécaniques auxquelles il est soumis lors de sa fabrication.

Le béton est sujet à un ensemble de mécanismes de structuration (hydratation, floculation ...etc.) et de déstructuration (malaxage, vibration, ... etc.).

Les trois composants de base sont l'eau, le ciment et les granulats.

Des additions peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau divers hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange. [6]

I.4.1 Ciments

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température (vers 14500 c) et broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils forment une pâte susceptible de faire prise et de durcir grâce à une réaction d'hydratation en général exothermique. [7]

I.4.1.1 Composition Chimique et Minéralogique

a) Clinker :

Le clinker est le produit sortant du four à ciment avant broyage. Les clinkers obtenus peuvent être très différents les uns des autres suivant les matières premières utilisées, le procédé de fabrication et la vitesse de refroidissement. [6]

Tableau I.1 : Composition minéralogique de clinker. [6]

Constituants	Composition et abréviation	Nom particulier	Pourcentage (%)
Silicate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C3S)	Alite	45-65
Silicate dicalcique	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C2S)	Bélite	15-25
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A)		0-15
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{F}_2\text{O}_3$	Célit	0-10

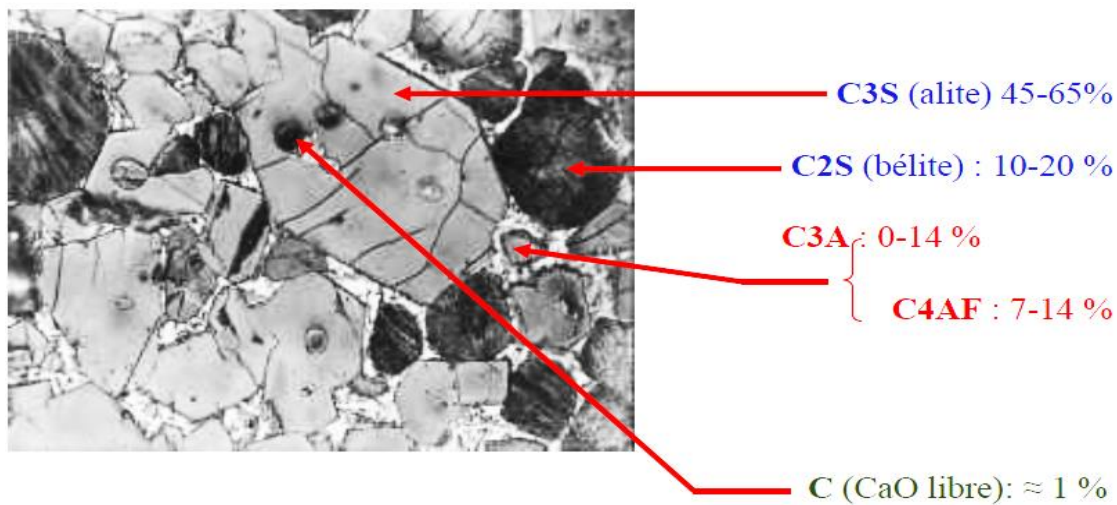


Figure I.2 : MEB ; les minéraux principaux du clinker

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO₂), de 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1 % à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃) Tableau I.2. [8]

Tableau I.2 : Composition chimique de clinker

Les oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	Cl	Pert au feu
Minimum (%)	20.0	3.7	1.7	61.0	1.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0.2
Maximum (%)	24.3	7.1	5.7	68.1	4.0	1.4	0.7	1.3	0.6	1.2	0.4	0.1	1.1

b) Gypse

Durant la fabrication du ciment Portland, on ajoute du sulfate de calcium (gypse) afin de réguler la prise. En particulier, le contrôle de l'hydratation est lié à la quantité d'ions SO₄²⁻ en solution, qui dépend elle-même de la solubilité du sulfate de calcium ajouté au clinker. [6]

I.4.1.2 Hydratation Du Ciment

Le ciment portland possède des propriétés hydrauliques. Les réactions d'hydratation des 4 phases de ciment Portland se passent en même temps et contribuent avec une intensité différente au dégagement de chaleur du ciment. [8]

a) Hydratation De C3s

Le C3S est la phase la plus importante du ciment. La chaleur dégagée par cette phase est l'une des plus élevée. La majeure partie de son hydratation se passe dans les 28 premiers jours. La réaction complète peut prendre jusqu'à 1 année.

La formule complète de C3S est : **3CaO.SiO2**

Au contact avec l'eau



C-S-H + portlandite

Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH). [8]

b) Hydratation De C2S

La vitesse d'hydratation de b-C2S est beaucoup plus faible que celle du C3S. Le b-C2S va surtout participer au développement des résistances après 28 jours et dégage une très faible chaleur.

La formule complète de C2S est : **2CaOSiO2** Au contact avec l'eau :



C-S-H + portlandite

Les produits d'hydratation sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et l'hydroxyde de calcium ou portlandite (CH).

La formule du C-S-H donnée dans l'équation (C3S2H3) est approximative.

La quantité de CH produite dans ce cas est plus faible d'un tiers que dans le cas du C3S. La faible quantité de CH va favoriser le développement de meilleures résistances que dans le cas du C3S

Produits d'hydratation vus au **MEB**

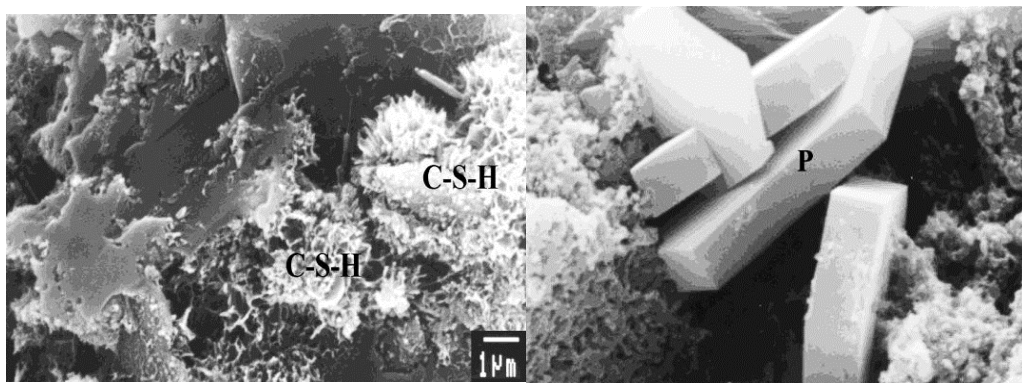


Figure I.3 : C-S-H externe cristallisé par précipitation Cristaux de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [8]

c) Hydratation de C3A et C4AF

La réaction du C3A avec l'eau est très violente et exothermique, et si rien ne l'empêche, elle causera une prise éclair. C'est pour cette raison que du gypse soit additionné au clinker broyé pour retarder cette réaction. Il réagit avec le C3A et l'eau pour former des sulfoaluminates de calcium hydraté qui sont insolubles.

Le C3A a une influence sur la prise initiale de la pâte, mais passée cette étape il influence peu le comportement de la pâte sauf en cas d'attaque par les sulfates. Il contribue peu à la résistance de la pâte.

La formule complète de C3A est : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

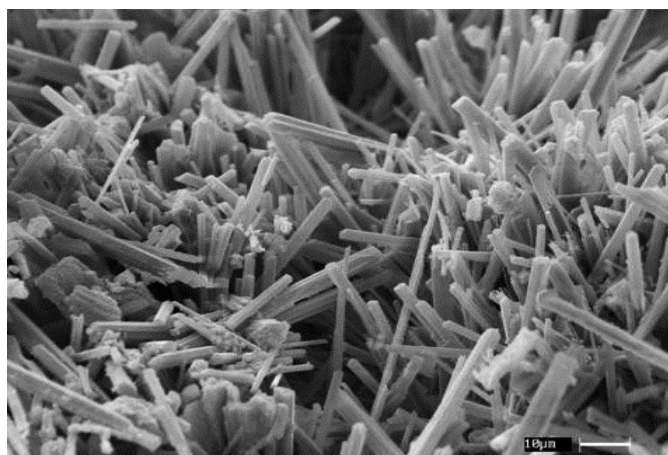


Figure. I.4 : image en microscopie électronique à balayage de cristaux d'ettringite

I.4.1.3 Classification des ciments

a) Classification suivant la composition

La norme européenne NF EN 197-1 [7] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

- ✓ CEM I: Ciment Portland Artificiel.
- ✓ CEM II : Ciment Portland Composé.
- ✓ CEM III : Ciment de Haut Fourneau.
- ✓ CEM IV : Ciment Pouzzolanique.
- ✓ CEM V : Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

b) Classification Suivant Les Résistances a la Compression :

La norme européenne NF EN 197-1 [9] classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression voir (Tableau I.3):

Tableau I.3 : Résistance à la compression des ciments [9]

Classe de résistance	Résistance à la compression(Mpa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
23.5N	—	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 10.0	—		
42.5 N	≥ 10.0	—	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≥ 20.0	—		
52.5 N	≥ 20.0	—	≥ 52.5	—
52.5 R	≥ 30.0	—		

I.4.2 L'eau de gâchage (NF EN 1008) [10]

Cette eau est un ingrédient essentiel du béton, joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement.

La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure et la cinétique d'hydratation.

I.4.3 Les Granulats (XP P 18-540) [11]

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneau). Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80 % environ du volume de ce dernier.

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme XP P18-540

Sont les suivantes:

- fillers $0/D$ ou $D < 2$ mm
- sables $0/D$ ou $1 < D \leq 6,3$ mm
- graves $0/D$ ou $D > 6,3$ m
- gravillons d/D ou $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm

I.5 Les Bétons Ordinaires (BO)

I.5.1 Définition Du Béton Ordinaire

Le béton est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de $2\,500\text{ Kg/m}^3$, Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints.

Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage.

I.5.2 La Composition Du Béton Ordinaire

I.5.2.1 Le Ciment

Pour un béton ordinaire, nous pouvons utiliser des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C ou CEM V. Le choix et le dosage déterminent la résistance du béton ainsi que ces différentes propriétés.

I.5.2.2 Les Granulats

Une bonne partie de la résistance du béton est tirée des granulats, principalement des gros granulats, d'où l'importance de l'emploi des granulats ayant des dimensions maximales et de bonnes qualités. Plus les grains seront fins, plus le dosage du ciment devra être élevé.

I.5.2.3 Rapport Ciment-Eau

L'eau doit être propre dans le but d'éviter au maximum les impuretés telles que les matières organiques ou les alcalis pouvant entraîner la corrosion du béton armé en cas d'utilisation d'armatures. La quantité d'eau est en général comprise entre 140 et 200 litres/m³. On estime que 50% de l'eau de gâchage servira à l'hydratation du ciment et les 50% restant contribuera à la plasticité du béton, nécessaire pour sa mise en œuvre.

I.5.2.4 Rapport Granulat-Sable

Le rapport granulat-sable doit être inférieur à 2. En effet, si le rapport est supérieur à 2,2, la résistance en compression ainsi que la densité augmenteront considérablement. Par contre, cela rendra l'ouvrabilité ou la maniabilité du béton moindre.

I.5.3 Formulation Du Béton Ordinaire

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment:

- ✓ la méthode de Baron.
- ✓ la méthode de Bolomey.
- ✓ la méthode de Féret.
- ✓ la méthode de Faury.
- ✓ la méthode de Dreux-Gorisse.

I.6 Les Bétons A Hautes Performances BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 Mpa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP).

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité.

Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc.)

I.6.1 Définition Du Béton A Haute Performance

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :

- ❖ une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ;
- ❖ un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ils présentent une micro-texture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.

I.6.2 Spécifications Sur Les Constituants Du Béton A Haute Performance

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

I.6.2.1 Ciments

Conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillée 42,5 ou 52,5 (N ou R).

I.6.2.2 Granulats

Conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10 : « granulats pour bétons hydrauliques »).

I.6.2.3 Additions

Conformes aux diverses normes en vigueur – cendres volantes silicoalumineuses, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).

I.6.2.4 Adjuvants

Plastifiants réducteurs d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

I.6.3 Formulation Du Béton A Haute Performance

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

Des outils spécifiques de contrôle ont été développés pour faciliter la formulation des BHP méthode des coulis AFREM, méthode MBE (Mortier de Béton Équivalent), logiciel BETONLAB.

I.6.4 Propriétés Physico-Chimiques Et Mécaniques Des Bétons A Haute Performances

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité, gage de durabilité.

I.6.4.1 Résistances mécaniques

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

I.7 Les Bétons Projetés

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance par projection sur un support au moyen d'un jet d'air comprimé. Le compactage est réalisé par la projection du béton. Le béton projeté permet de réaliser les formes les plus complexes sans l'utilisation de coffrages, telles que dômes, coques, etc. Il est le plus souvent utilisé dans les travaux souterrains ou en technique de

réparation ou de soutènement, ainsi que dans la conception des panneaux 3D. Le mélange à projeter peut-être préparer sur chantier, en usine où dans une centrale à béton.

L'avantage de la méthode est de pouvoir utiliser les matériaux locaux, et les matériaux que Constituent les déchets naturels et industriels (fines, pouzzolane, cendre volante, laitiers, etc...) limitant ainsi les frais de transport. Son utilisation représente donc généralement un avantage économique.

I.7.1 Domaines D'application

L'utilisation du béton projeté est justifiée dans plusieurs cas par sa méthode de mise en place unique, qui élimine les coffrages complexes et permet des formes variées. Le béton projeté peut être utilise:

- Pour le recouvrement de murs ou d'éléments de structures, en extérieur comme en intérieur.
- Dans les nouvelles constructions telles que stabilisation des pentes, revêtements de parois de tunnels, piscines et toutes autres constructions en béton.
- Pour l'exécution d'un revêtement définitif, il est utilisé lorsqu'une solution par coffrage est Délicate à mettre en place.
- En travaux souterrains, en réparation provisoire en tant que membrane de protection ou de
- Soutènement ou en revêtement définitif dans un rôle structurel.
- Dans les travaux de réparations des éclatements du béton d'enrobage.
- Ouvrages sur talus et blindages de fouilles.
- Pour le renforcement de murs en béton armé.
- En réfection de parois de béton endommagé par des incendies.
- Pour la construction d'ouvrages en béton de forme libre.

I.7.2 Avantages Et Inconvénients Des Bétons Projetés

Par rapport au béton coffré, le béton projeté présente plusieurs avantages, tels que la flexibilité d'emploi, la rapidité d'exécution, l'exécution de voile mince de grande surface, la protection des talus, bonne adhésion à l'état plastique, résistance au lessivage, faible retrait, faible perméabilité, résistance élevée aux attaques des sulfates. Quant aux inconvénients, citons le coût élevé par rapport au béton traditionnel.

I.7.3 Techniques De Projection

Il existe principalement deux techniques distinctes de projection du béton ; projection par voie sèche et projection par voie mouillée.

I.7.3.1 Voie Sèche

Cette technique est envisageable le plus souvent pour les travaux de réparations. Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur sans eau. Il est propulsé par air comprimé le long d'une tuyauterie vers la lance de projection. L'eau arrive séparément à la lance en quantité nécessaire et réglable pour assurer l'humidification du mélange au moment de la projection sur le support (Figure I.5).

Cette méthode permet d'atteindre de grandes distances de projection par rapport à la voie humide.

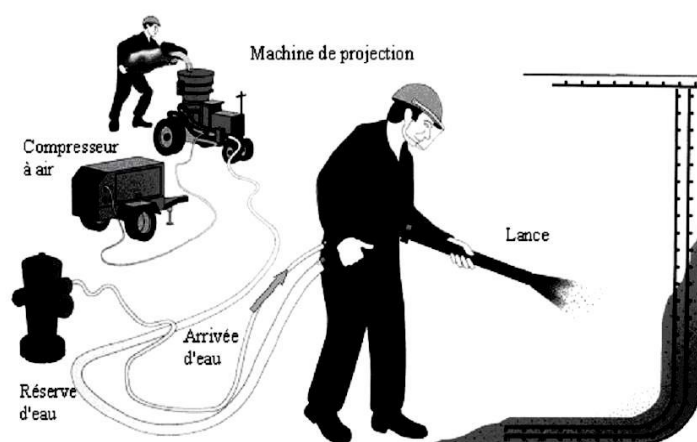


Figure. I.5 Procédé de projection par voie sèche

I.7.3.2 Avantages Et Inconvénients De La Projection Par Voie Sèche

Comme avantages, citons la facilité et flexibilité d'application, la possibilité d'arrêter le procédé et le reprendre à tout moment durant les travaux, un faible rapport Eau/Liant et par conséquent, obtention facile de résistances élevées. Quant aux inconvénients, il y a lieu de former particulièrement les portes-lance. Par ailleurs, le contrôle de la qualité est assez complexe.

I.7.3.3 Voie Mouillée

Contrairement à la voie sèche, la voie mouillée consiste à introduire l'eau dans l'élance avant son déversement dans la machine, c'est-à-dire au moment de son malaxage. Il est suite pompé dans un

boyau et projeté à haute vitesse. La projection est assurée par de l'air comprimé éventuellement associé à des adjuvants liquides (Figure I.6).

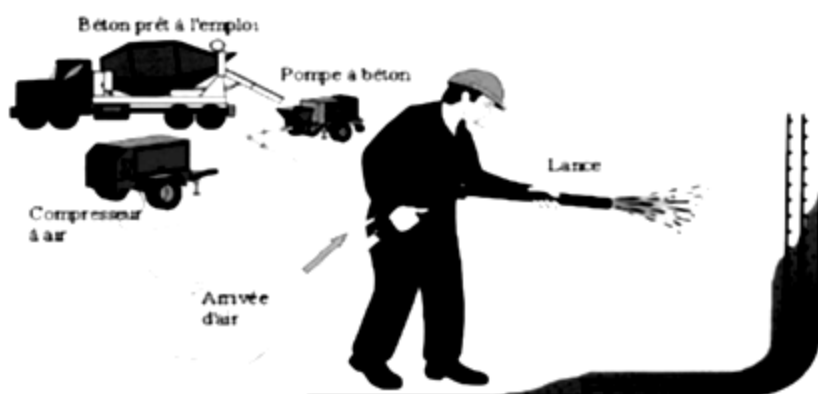


Figure I.6 Procédé de projection par voie mouillée

Cette technique est utilisée en particulier pour la réalisation de travaux souterrains ou de travaux d'assainissement, aussi bien en travaux neufs qu'en réparation d'ouvrages anciens.

I.7.3.4 Avantages Et Inconvénients De La Projection Par Voie Mouillée

L'augmentation de la capacité de production et la faible quantité de poussières constituent des atouts certains. Par contre, la grande quantité de ciment induit des retraits importants, les distances de pompages sont limitées et le coût des équipements est élevé.

I.7.5 Composants Du Béton Projeté

I.7.5.1 Ciment

Les deux types de ciment les plus souvent utilisés en béton projeté sont le ciment Portland ordinaire et le ciment Portland à haute résistance initiale. La différence entre ces deux types de ciment est la finesse des grains de ciment qui est plus faible dans le cas du ciment Portland ordinaire.

I.7.5.2 Granulats

La granulométrie désirée est déterminée selon la surface spécifique du granulat, le volume relatif occupé par le granulat, la maniabilité du mélange et la tendance à la ségrégation. En béton projeté par voie sèche, la distribution granulométrique du béton a surtout un effet sur le rebond. La composition du béton avant la lance et la composition en place du béton doivent également être prises en compte. Evidemment, les différentes tailles de particules ne rebondissent pas de la surface à des taux

équivalents. Une bonne distribution granulométrique avant projection permet d'obtenir un béton projeté en place durable et bien compacte. Jolin et al. (1999) ont confirmé que la granulométrie recommandée [1] est la granulométrie optimale, pour le béton projeté par voie sèche. L'optimisation granulaire du mélange permet de réduire considérablement les rebonds et donc de mieux contrôler la composition du béton en place dont la composition est proche du mélange initial, elle est aussi valable pour le béton projeté par voie humide [1].

I.7.5.3 Sable

Compte tenu de l'importance de la propreté des sables, la valeur exigée pour l'équivalent de sable visuel doit être supérieure ou égale à 85. Cette valeur conditionne les critères de qualité du béton projeté ainsi qu'un bon passage en machine. Elle est indispensable pour les résistances supérieures ou égales à 40 MPa.

Les propriétés du béton ne sont pas impactées par la granulométrie du sable. Cependant, l'utilisation d'un sable dont le module de finesse est plus élevé, peut améliorer la résistance au gel-dégel en présence de sels fondants.

Il est difficile d'expliquer les phénomènes en cause, mais il est probable qu'il s'agit de phénomènes reliés à la projection qui modifient la structure interne du béton durci.

I.7.5.4 Eau

L'eau étant rajoutée à la lance de projection, elle n'est prise en compte qu'en fonction du mode de fabrication du mélange.

L'eau ajoutée à la lance, doit avoir les mêmes qualités que l'eau de gâchage d'un béton oulé. Elle doit être conforme à la norme [10]. « Eau de gâchage pour béton ».

I.7.6 Formulation Des Bétons Projetés

Une première méthode de formulation des bétons projetés, présentée par Gérôme (2003) se base sur quatre étapes :

- Préparation du mélange : cette étape peut être réalisée sur chantier, en centrale ou en usine, comme indiqué précédemment.
- Malaxage et homogénéisation en machine des matériaux à l'état sec ou humide.
- Transfert du mélange depuis la machine jusqu'à la lance.

-
- Projection du mélange sur le support à revêtir par air comprimé.

La projection peut être réalisée soit par voie sèche soit par voie humide, selon la nature des matériaux utilisés et la nature des travaux à effectuer.

Cependant, les résultats vont présenter quelques différences. En voie sèche, on obtiendra une résistance plus élevée qu'en voie humide, du fait du faible rapport E/C mais on aura une capacité de production plus limitée, un dégagement de poussière plus important, mais surtout un risque de détérioration d'un support fragile.

I.7.6.1 Passage Dans La Machine

Le passage du mélange dans la machine est directement lié à son écoulement dans le corps de l'engin. Pour qu'il soit correct, cela nécessite :

- Pour un mélange à projeter par voie sèche

Une granulométrie continue et adéquate du mélange sec, une faible teneur en éléments fins ($< 80 \mu\text{m}$) limitant les risques de colmatage (notamment au niveau de l'injection d'air comprimé) et une faible cohésion (teneur en eau de pré-humidification limitée).

- Pour un mélange à projeter par voie mouillée

Une consistance du mélange mouillé adaptée, suffisamment fluide (teneur en eau et emploi d'un adjuvant fluidifiant) pour se mouvoir facilement dans les pistons mais avec un minimum de cohésion interne pour limiter les risques ségrégation (éléments fins et granulométrie du mélange).

A noter que la projection par voie sèche génère des poussières à la lance et à la machine. Ces poussières peuvent être réduites avec la préhumidification du mélange, le prémouillage ne permettant de réduire les poussières qu'à la lance et non à la machine.

Des solutions techniques permettent aussi de réduire les poussières ambiantes (système d'aspiration à la machine) par récupération des poussières émises.

I.7.6.2 Arrangement Du Béton Sur Le Support

a) Voie Sèche :

Les éléments arrivent de manière indépendante sur le support (dispersions des éléments dans le flux d'air dans la tuyauterie puis ségrégation des vitesses dans le cône de projection). En début de projection le support, nu et rigide, génère un choc élastique (choc de deux particules solides avec transfert total de l'énergie). Les éléments de grande inertie rebondissent seuls, la pâte de ciment, les

fines et l'eau adhèrent sur le support. Ces éléments fins hydratés s'incruster dans les pores (adhérence mécanique), puis recouvrent le support en formant un matelas de pâte de ciment. Lorsque ce matelas d'accueil est suffisamment épais, des granulats peuvent s'y incruster comme le montre [2]. L'incrustation des granulats dépend de la taille et de la vitesse des granulats, de la consistance du matelas récepteur fonction de la plasticité, de la viscosité et des granulats déjà en place [12]. Ainsi en début de projection, seuls les sables peuvent s'incruster dans le matelas déjà en place puis ce sont tous les granulats.

Les éléments qui ne peuvent s'incruster dans le matelas de béton rebondissent en compactant le béton (transmission d'une partie de leur énergie cinétique). Ils participent ainsi à la constitution de la couche de béton.

Avec un mélange de répartition granulaire homogène, on augmente la probabilité que le grain qui arrive sur le support trouve l'espace suffisant pour s'incruster, d'où l'intérêt d'une granulométrie continue.

Les pertes par rebond sont généralement constituées de graviers (et de fibres dans le cas des bétons fibrés). Une partie des éléments n'atteint pas le support (perte de vitesse importante) et tombe au sol : ce sont les retombées, elles sont comptabilisées dans les pertes. Les pertes sont inévitables lors de la projection mais peuvent être limitées grâce à :

- Une teneur en éléments fins suffisante pour permettre la formation rapide de la couche d'accueil.
- Une granulométrie continue qui favorise l'arrangement des grains sur le support.
- Des granulats de diamètre maximal limité.
- Une parfaite maîtrise de la tenue de la lance.

Il est dangereux en termes de qualité du béton en place de s'attacher à limiter absolument les pertes.

b) Voie Mouillée

L'aspect du mélange en sortie de lance est un ensemble de petites masselottes de béton (constituées d'une mince couche de pâte de ciment entourant un granulat) de consistance plastique véhiculées par un flux d'air comprimé [2]. Ces éléments s'empilent sur le support pour former la couche de béton.

La force de projection n'est pas aussi importante qu'en voie sèche mais suffit à compacter et à assurer la tenue au support de l'ensemble de la couche.

L'ajout de raidisseur à la lance permet de figer quasi-instantanément le béton sur le support. Cette rigidité artificielle n'est que superficielle mais permet d'éviter l'affaissement du béton.

Ces produits ne modifient pas le temps de prise. L'emploi d'un raidisseur n'est pas forcément nécessaire [3].

Cette technique génère moins de pertes que la projection par voie sèche et la courbe granulométrique des bétons en place sur le support est proche de celle des mélanges avant projection.

En voie mouillée, les pertes ne peuvent être limitées que par la maîtrise de l'art de la projection. Les granulats de grande taille, supérieure à 20 mm, ont une trop grande inertie et peuvent rebondir quasi systématiquement [2].

I.8 Les Bétons Autoplaçants

I.8.1 Définition

Le béton auto plaçant (dénommé aussi auto compactant) est défini selon la norme SN EN 206-1 : Le béton frais est appelé autoplaçant lorsqu'il se compacte suffisamment grâce à son poids propre tout en ne présentant pas ségrégation. Le BAP et le béton vibré se différencient par les propriétés du béton frais et le mode de mise en œuvre. [4]

Le béton auto compactant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les suivantes :

- ✓ Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation (comme du miel)
- ✓ désaération du béton pendant son écoulement
- ✓ excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense. Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé. [5]

I.8.2 Classification Des BAP

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

A l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages des génies civil,

à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies des mises en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques.

Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

On distingue donc aujourd'hui trois catégories :

- **Catégorie 1** : IL s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface.
- **Catégorie 2** : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage).
- **Catégorie 3** : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

I.8.3 Concept Du Béton Auto Plaçant

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons auto compactant ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivellant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçant (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence ségrégation dynamique) et une fois en place (absence ségrégation statique). Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général,

les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

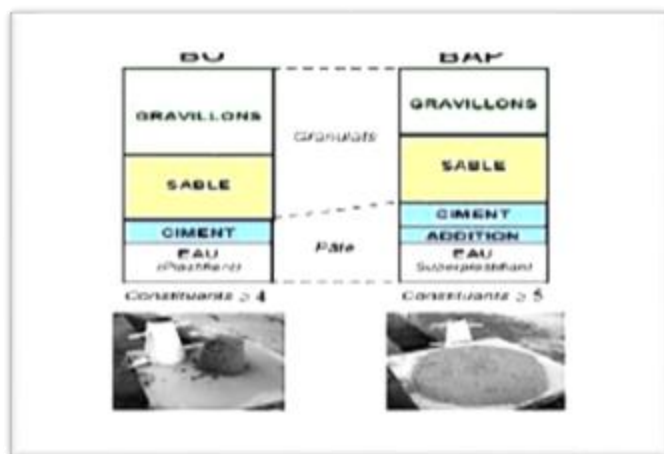


Figure I.7 : Aspect à l'état frais

D'un BO plastique et d'un BAP

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des BAP en France coïncide d'ailleurs à l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylates, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules. La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation.

I.8.4 Domaines D'utilisation Privilégiés Des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

- ✓ des densités de ferrailage importantes ;
- ✓ des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- ✓ des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;

-
- ✓ des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
 - ✓ des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
 - ✓ des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration. [8]

I.8.5 Constituent Du Béton Autoplaçant

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat, ainsi que de celle du lien qui les unit. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Pour toute combinaison de matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment. Une teneur en eau élevée dilue la pâte (la colle du béton).

La réduction de la quantité d'eau présente les avantages suivants :

- Augmentation de la résistance en compression et en flexion.
- Réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption.
- Résistance accrue aux agents atmosphériques.
- Amélioration de l'adhésion entre les couches successives et entre le béton et l'armature.
- Réduction des tendances à la fissuration causée par le retrait.
- Réduction des variations de volume imputables au mouillage et au séchage.

I.8.5.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui est gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et processus d'hydratation et qui, après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il est principalement composé de calcaire et d'argile.

Le ciment joue le rôle de liant dans le béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker additionné de gypse (3 à 5 %), et éventuellement pour les ciments composés, d'autres constituants secondaires, tel que, le laitier de haut fourneau : un résidu minéral issu de la préparation de la fonte à partir du minerai de fer du coke métallurgique, de cendre volante ou de fillers calcaires (granulats fins obtenus par broyage de roches).



Figure I.8 : la poudre du ciment portland

❖ Les différents types de ciment

La normalisation des ciments (NF EN 197-1) distingue cinq types de ciments courants :

➤ les ciments portlands : CEM I

Ces ciments contiennent au moins 95 % de clinker.

➤ les ciments portlands composés : CEM II

On distingue deux catégories de CEM II : les CEM II/A qui contiennent plus de 80 % de clinker et moins de 20 % de constituants secondaires ; les CEM II/B dont les valeurs sont respectivement plus de 65 % de clinker et moins de 35 % de constituants secondaires.

➤ les ciments de hauts fourneaux : CEM III

Ces ciments sont subdivisés en trois catégories selon leur teneur en laitier : les CEM III/A (de 36 à 65 % de laitier), les CEM III/B (de 66 à 80 % de laitier) et les CEM III/C (de 81 à 95 % de laitier).

Le reste des constituants est du clinker avec éventuellement un filler dans la limite de 5 % de l'ensemble des constituants.

➤ les ciments pouzzolaniques : CEM IV

On distingue également deux catégories : les CEM IV/A qui contiennent plus de 65 à 90 % de clinker ; les CEM IV/B dont la valeur est de 45 à 64 % de clinker.

Le reste des constituants sont des ajouts pouzzolaniques avec éventuellement un filler dans la limite de 5 %. Les ajouts pouzzolaniques peuvent être des fumées de silice, des pouzzolanes naturelles et des cendres volantes siliceuses.

➤ les ciments au laitier et aux cendres : CEM V

Ils sont subdivisés en deux catégories selon leur teneur en laitier de haut fourneau et de pouzzolanes naturelles ou de cendres volantes siliceuses : les CEM V/A (de 18 à 30 %) et les CEM V/B (de 31 à 50 %).



Figure I.9 : Ciments utilisés dans la confection des bétons autoplaçant

I.8.5.2 Granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont quelques fois encore appelés « agrégats ». Vieux usages tout à fait impropres, en effet le dictionnaire donne la définition suivante : Agrégat : Réunion des substances diverses formant un tout non homogène. Le béton, par exemple est un agrégat de gravier, sable et ciment, ce dernier jouant le rôle de matière d'agréation.

Les spécifications auxquelles doivent satisfaire les granulats sont précises dans la norme XP P 18 -540 d'octobre 1997 qui remplace les normes P18-101 de décembre 1990 et P18-541 de mai 1994. Cette norme regroupe les caractéristiques qui doivent présenter en général les granulats destinés à la confection du béton hydraulique.

Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles :

- **La catégorie A** : correspond aux granulats destinés à la confection du béton de qualité tels que ceux destinés à la construction d'ouvrages d'art ou de bâtiments pour lesquels la résistance caractéristique R_C est supérieure ou égale à 35 MPA ; éventuellement certaines caractéristiques des catégories B ou C étant tolérées.
- **La catégorie B** : sont destinés à de bons bétons ainsi qu'à ceux pouvant être situés dans un environnement agressif, à condition que leur coefficient d'absorption respectent les spécifications imposées aux granulats de catégorie A.
- **la catégorie C et D** : conviennent pour les bétons courants à condition, dans le cas d'utilisation de granulat D, que seuls deux de leurs caractéristiques soient présentées et que les autres correspondent à celle de catégories supérieures, faute de quoi ils ne doivent pas être utilisés dans la courante confection de béton.

Le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment.

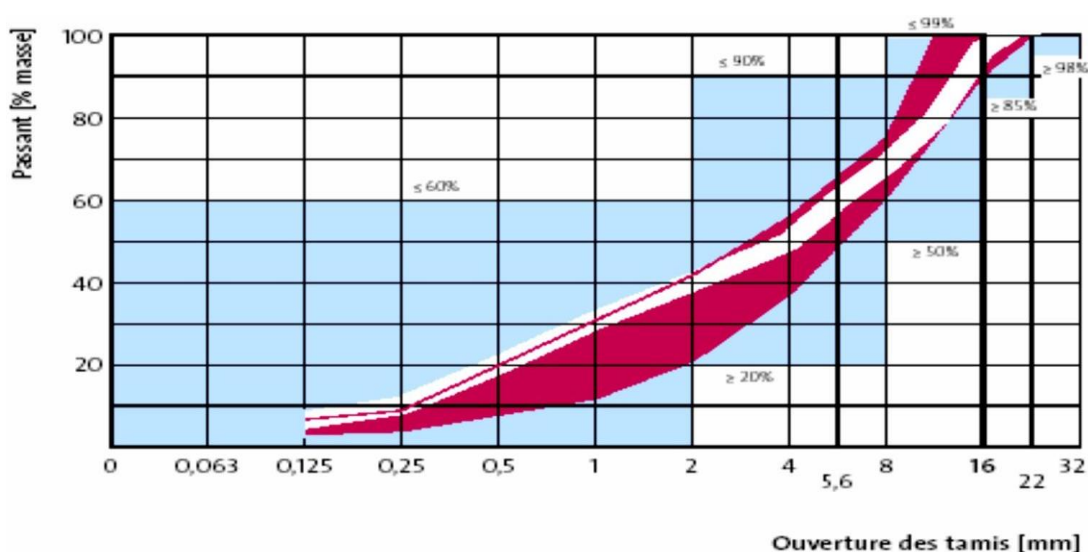


Figure I.10 : Choix de la granularité pour un BAP 0-16

Remarque :

- En bleu, valeurs limites absolues selon SN EN 12 620.
- En rouge, fuseau conseillé Pour béton vibré.
- Le fuseau optimal pour BAP est indiqué en blanc.

I.8.5.3 Sable

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80µm et 05mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3mm et dont le passant à 80µm n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5mm, non compris les fillers.

a) Origine Des Sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques ; Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien.

b) Différents Types De Sable**1) Sable D'origine Naturelle**

Le sable est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz, provenant de la désagrégation des roches sous l'action de divers agents d'érosion et de cours d'eau. Les plus gros grains de sable se retrouvent ainsi le long des cours d'eau, aux bords des mers, ou dans les régions désertiques. En milieu fluvial, les grains s'usent peu et restent donc gros et anguleux. En milieu continental, l'usure des grains de sable par le vent et l'eau entraîne une modification de leur forme (ou morpho scopie) au cours des temps géologiques : les grains de sable usés deviennent émoussés et luisants (milieu littoral), ou l'altération des roches riches en quartz (granites, gneiss) sous l'action de processus physiques (vent, eaux courantes) ou chimiques (action dissolvante de l'eau).

Les grains de sable qui se forment sont généralement gros et anguleux, difficilement transportables par le vent et les ronds et mats (milieu éolien). En s'arrondissant, les grains deviennent

plus petits. Les sables peuvent également se consolider et se cimenter ultérieurement pour donner naissance à des grès (grès quartzeux, grès calcaires). Ce type de sables est principalement constitué de quartz (silice), avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite. La couleur du sable est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée.

2) Sables Non Alluvionnaires (Sable De Dune)

Il s'agit essentiellement de sables anciens, c'est-à-dire de dépôts détritiques déposés à des périodes géologiques variées, à des distances plus ou moins grandes des rivages. En fonction des conditions paléogéographiques, ces dépôts ont été plus ou moins brassés par les courants et recouverts par d'autres formations sédimentaires et se retrouvent actuellement émergés sur des étendues variables et des épaisseurs également très diverses. De façon générale, ces dépôts constituent cependant des gisements beaucoup plus étendus et généralement plus épais que les dépôts alluviaux.

La plupart de ces sables ont actuellement des utilisations soit limitées (essentiellement remblais et couches de forme, parfois granulats pour couche de fondation), soit très spécialisées (sables de verrerie et de fonderie, bétons de type cellulaire).

3) Sable d'origine artificielle

Provient de concassage des roches naturelles comme le calcaire, ou artificielle (pouzzolane); dit aussi sable concassés, caractérisées par une meilleure adhérence agrégat/liant.

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon), ils peuvent être soit :

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant.
- Des sables de concassage qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière caractérisée par une meilleure adhérence agrégat/liant.

I.8.5.4 Eau

L'eau est l'un des ingrédients des bétons, on pourrait même dire qu'il est le plus important avec le ciment. En effet, l'eau que l'on introduit dans le béton lors du gâchage accomplit deux fonctions : une fonction physique qui confère au béton les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique qu'elle contribue au développement de réaction dite hydratation. Pour le gâchage du mélange de béton on utilise de l'eau qui ne doit pas contenir des composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats et les autres, et aussi éviter les particules en suspensions dont la qualité pourrait modifier ses qualités originales.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher de béton parce qu'elles contiennent dans certains cas un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés du béton, notamment les propriétés physique et mécanique (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité de béton) ces impuretés éventuellement contenue dans l'eau de gâchage, soit des composés chimiques qui peuvent être actifs.

1) Le rôle de l'eau

L'eau est certainement le constituant des bétons le plus délicat à aborder .En effet, elle agit d'une façon antinomique sur deux propriétés essentielle qui sont :la consistance et la résistance .l'excès d'eau qui ne sera pas liée à hydratation ,créera au sein du matériau d'espace vide ou partiellement rempli d'eau qui affectera directement les performances .l'eau est indispensable pour obtenir une bonne consistance ,plus le dosage en eau est important plus l'écoulement du béton est facile ,il s'agit donc de trouver un dosage en eau optimal qui permet de satisfaire aux exigences sur les principales propriétés du béton.

I.9 Les Fibres

I.9.1 Définition De Béton De Fibres

Le béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées (Figure I-11), dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés. Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, répartis uniformément dans la matrice et ayant une orientation aléatoire (naturelle) ou forcée. Les fibres sont capable de l'arrêt et coudre les fissures (Figure I-12) Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée la distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice. Par ailleurs, les fibres constituent une sorte de granulat filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectants très fortement le comportement global du matériau durci.

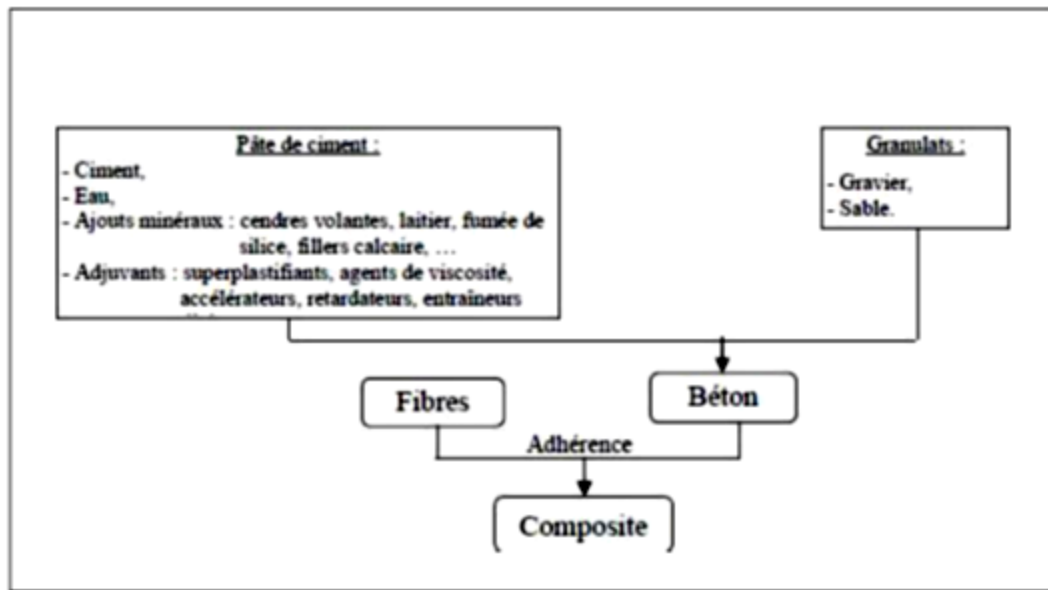


Figure I.11 : Modèle de composite à base des fibres

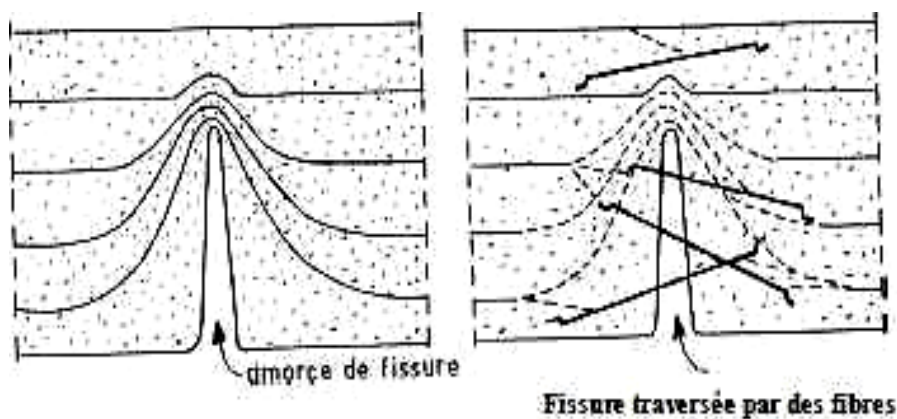


Figure I.12 : Rôle des fibres dans la matrice de béton

Le terme Fibre se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

Dans le rapport sur l'état de l'art publié par le comité 544, de L'American Concrete Institute en 1982 nous pouvons lire : "Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions.

I.9.2.2 Différents Types De Fibres

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension (macro ou micro- fibre) et aussi par leur propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont:

a) Fibres Naturelles

➤ Fibres Minérales :

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ... etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisée pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes.

➤ Fibres Végétales

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent à la plupart des acides organiques mais sont détruite par les acides minéraux forts. Il existe quatre sorts de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres de liber. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

b) Fibres Synthétiques

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, polyester ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIXème siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent des produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acrylique, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, t'issus pare-balle, les fuselages et ailes d'avion.

c) Fibres Artificielles

Ce type de fibre est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et

d'autre. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Nous allons présenter quelques principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons.

d) Fibers De Polypropylene

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille de polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée.

Ces fibres sont obtenues suivant les processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout des fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades de plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

➤ Fibres de verre

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 tours d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100mm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : les fibres de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- ❖ Bonne adhérence avec la matrice.
- ❖ Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues....).
- ❖ Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- ❖ Conductivité thermique relativement faible.

➤ Fibres Métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été resté encore l'objet de recherche très importante dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont les plus utilisées dans le domaine de génie civil. En effet les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interracial entre fibre et la matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur

l'irrégularité de la surface de la fibre. Ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibre qui se différencient les unes des autres par leurs diamètre, leur section (rond, carré, rectangulaire). Leur longueur et leur mode d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0,1 et 0,7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont les plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celle commercialisées par la société Bekaert sous la marque "DRAMIX".

Il existe d'autres types de fibres artificielles qui sont utilisé pour le renforcement des mortiers ou béton telle que, fibres d'amiante, fibres de cellulose...)

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : Dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées sont présenté dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées

Fibres	D (Um)	Long (mm)	densité	Rt (Mpa)	E 10 ³ Mpa	Allongement la rupture %	Coef de dilatation on (u/m)	Rfeu temps Max°C
Acier	5-500	20-80	7.8	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte	36*2600	50-60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5-20	40-70	2.6	1500-3000	80	2-3.5	9	800
Polypro pylène	10-200	25-75	0.9	400-750	5-10	15-25	9	150
Polyeste r	-	-	1.4	700-850	8	11-13		

Amiant e	0.02-20	5	2.5- 3.4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5-9	variable	1.7-2	2000- 3000	250-400	0.5-1.5	-	400-1500
Sisal	10-50	1.50	1.5		130	3	-	-

I.9.3 Critère De Choix Du Type De Fibres

Leur géométrie est très variable (Figure I.13). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [13] et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

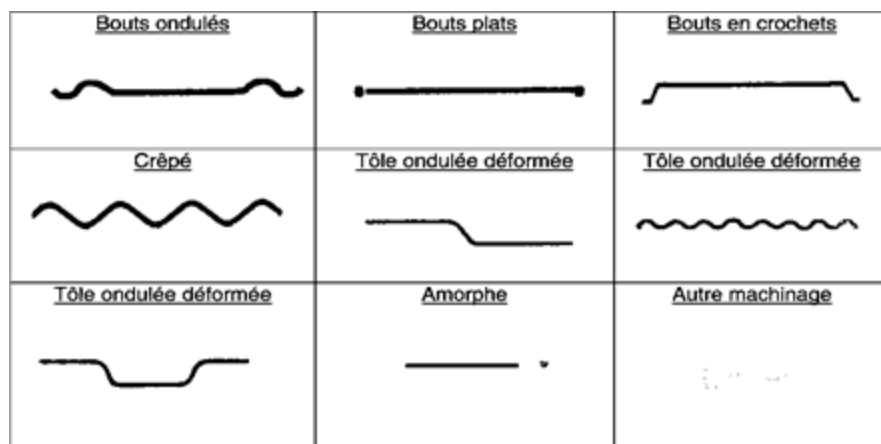


Figure I.13 : Différentes Formes géométriques De fibres métalliques

I.9.4 Rôle Des Fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité.

Il n'a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la (Figure I-14-a).
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure I-14-b).

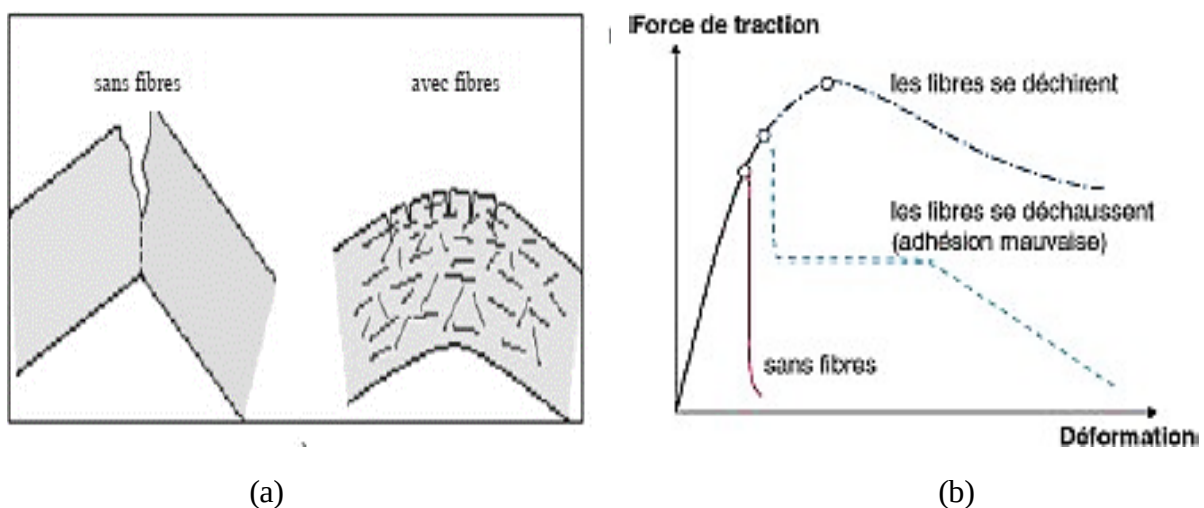


Figure I.14 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres

CHAPITRE II : RHEOLOGIE GENERALE

II.1 Définition De La Rhéologie

La rhéologie (le terme fut inventé par Eugène Bingham en 1928, à partir du mot grec $\rho\epsilon\iota\nu$, signifiant écoulement) est la science qui étudie et décrit l'écoulement, la déformation et la rupture d'un corps sous l'effet d'une contrainte [16].

La rhéologie constitue un outil analytique très puissant permettant une identification et un suivi de la stabilité et du vieillissement, conduisant aussi à des corrélations et des interprétations moléculaires [17].

A. Malkin et A. Isayev [18] soulignent que la définition traditionnelle de la rhéologie est très proche de celle de la mécanique du milieu continu : l'étude des déformations et des écoulements de la matière [19] sans distinction des particularités du matériau. Cependant, la rhéologie moderne met l'accent sur les aspects suivants :

- les propriétés de la matière déterminant son comportement, par exemple sa réaction conjuguée aux déformations et aux écoulements, mais pas sa réaction aux déformations et aux écoulements seuls.
- l'étude des matériaux ayant des propriétés décrites par des relations entre la force et la déformation non linéaires.
- les matériaux dont les déformations intègrent les effets élastique, visqueux et plastique.
- La rhéologie est une science qui traite des propriétés mécaniques de produits variés : solide, liquide, et intermédiaires. Il existe deux approches complémentaires [14]
- l'approche macroscopique, qui consiste à établir les relations entre les forces appliquées et les effets géométriques engendrés par ces forces à grande échelle. La forme mathématique de ces relations est l'équation rhéologique d'état ou l'équation constitutive. Les lois fondamentales comme la loi de Hooke et la loi de Newton sont les équations constitutives les plus simples.
- l'approche microscopique, qui a pour but d'identifier les mécanismes responsables de la déformation du matériau à l'échelle de sa microstructure et de comprendre la relation entre la loi de comportement macroscopique et la microstructure.

II.2 Equations Générales

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées.

La déformation et l'écoulement sont en fait les conséquences de mouvements relatifs des particules d'un corps les unes par rapport aux autres.

Dans le cadre des matériaux fluides, on s'intéresse plus particulièrement à leur écoulement.

Généralement, en termes mécaniques, la grandeur cinématique correspondant à l'écoulement est le tenseur de gradient de vitesse ε

En coordonnées cartésiennes, on suppose que la vitesse v d'un élément représentatif se situant à (x, y, z) à l'instant t est la suivante :

S'écrit:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \frac{\partial V_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial V_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}$$

Une autre grandeur correspondant à la force appliquée à l'élément est le tenseur de contrainte σ , exprimé sous la forme suivante :

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

II.3 État fluide versus état solide

A l'origine, le terme rhéologie s'applique aux matières coulantes, car la racine de ce mot « rhéo » signifie « couler ». Mais il est très difficile de déterminer si un produit est « coulant », car cela dépend de l'échelle du temps d'observation (temps caractéristique précisé vers la fin de ce paragraphe). Par conséquent, ce terme est utilisé pour tous les matériaux.

La matière peut se trouver dans deux états principaux [14] :

- a) l'état solide : c'est le cas d'un corps qui conservera sa forme initiale en l'absence de force appliquée. La petite déformation engendrée sous l'action de forces modestes disparaît lorsque l'effort est supprimé. Cette déformation est dite alors élastique.

L'élasticité est une des caractéristiques essentielles des solides. Il est aussi nécessaire de distinguer les solides « durs » des solides « mous ».

- pour les solides durs (par exemple, les métaux et les minéraux), les modules élastiques sont de l'ordre de 10^{11} Pa. La dissipation d'énergie est négligeable dans ces matériaux dans le régime de déformation élastique.
- pour les solides mous, les modules élastiques sont beaucoup plus petits et les effets dissipatifs plus importants. Les élastomères, les gels de polymères et les cristaux colloïdaux entrent dans cette catégorie de matériaux. Les élasticités des cristaux colloïdaux se mesurent en quelques dizaines de Pascal, celles des élastomères varient entre 10⁵ et 10⁸ Pa, et les gels se situent dans une gamme intermédiaire.

Il existe pour chaque catégorie un seuil de contrainte au-dessus duquel les solides cassent ou commencent à fluer de façon irréversible. Pour les solides durs, il s'agit d'une rupture. Pour les solides mous, il y aura une déformation plastique. Ces derniers se comportent en quelque sorte comme un fluide à seuil.

- b) l'état fluide : c'est le cas des gaz et des liquides simples ou complexes. Les comportements de la matière fluide dépendent de l'échelle de temps sur laquelle a lieu la déformation. Ces fluides répondent élastiquement aux temps courts et comme un fluide visqueux aux temps longs.

Le temps caractéristique qui sépare ces deux régimes plastique et visqueux est appelé temps de relaxation viscoélastique. Il varie entre 10 et 12 s (cas de l'eau comme fluide visqueux ordinaire dans les conditions normales) et plusieurs centaines d'années (cas du manteau terrestre, qui se comporte comme un solide à l'échelle d'une vie humaine et comme un fluide très visqueux à l'échelle géologique).

Par conséquent, la distinction entre solide et fluide est relative et dépend de l'échelle de temps sur laquelle on observe l'évolution du matériau.

II.4 Lois Fondamentales Et Propriétés Rhéologiques

Les lois fondamentales développées en mécanique des milieux continus définissent les relations entre contraintes et déformations pour des matériaux « idéaux ».

II.4.1 Loi De Hooke Et Elasticité

Au travers d'une relation linéaire, la loi de Hooke permet de décrire un solide élastique parfait. L'équation constitutive s'écrit, équation II -1 :

✓ **Équation II.1 :** $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Où σ est la contrainte rationnelle appliquée en Pa, E est le module élastique en Pa, appelé élasticité et ε est la déformation rationnelle sans unité.

La contrainte rationnelle σ peut être calculée à partir de l'Équation II -2 :

✓ **Équation II.2 :** $\sigma = \frac{F(t)}{section(t)}$

Avec F(t) la force en N et S section (t) la surface de la section de contact en m² évaluée à l'instant t en s, et ε la déformation rationnelle (grandeur sans unité) calculée avec l'Équation II -3 :

✓ **Équation II.3 :** $d\varepsilon = \frac{dl}{l(t)} \rightarrow \varepsilon = \ln\left(\frac{l(t)}{l_0}\right)$

Avec l_0 la longueur initiale du matériau et l(t) la longueur de l'échantillon à l'instant t.

Cette loi montre que le corps retrouve sa forme initiale lorsque la contrainte est supprimée. La déformation élastique est dite « réversible ou récupérable ».

Le matériau élastique de Hooke répond instantanément à une sollicitation mécanique, puisqu'aucun temps caractéristique n'apparaît dans cette loi. La notion d'élasticité est donc liée à la notion de mémoire, la mémoire de son état antérieur.

Pour l'élasticité idéale ou parfaite, la courbe de charge correspond à la courbe de décharge, (Figure II.1 (a)). Dans le cas plus général où les courbes de charge et de décharge sont distinctes, l'élasticité est dite imparfaite, (Figure II.1 (b)). La réponse élastique est le comportement principal des solides. Les fluides ont aussi une composante élastique. Certains liquides possèdent de l'élasticité vis-à-vis des déformations de cisaillement mais elle est faible et imparfaite [21].

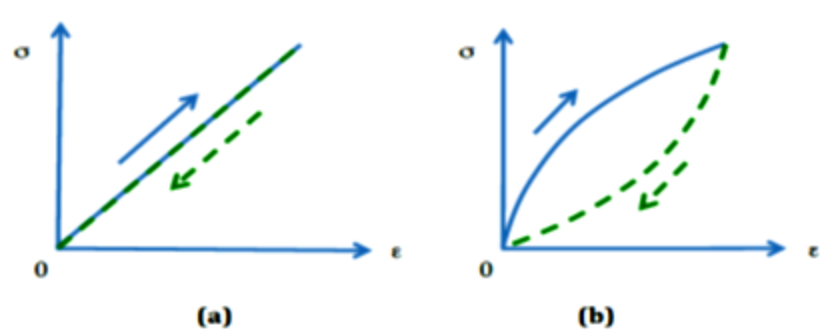


Figure II.1 : Courbes de charge et de décharge d'un corps élastique : (a) élasticité parfaite ; (b) élasticité imparfaite [21]

II.4.2 Loi de Newton et viscosité

La loi de Newton sert à caractériser le comportement dominant des fluides, sachant qu'a viscosité s'applique initialement aux liquides. Cette loi qualifie le phénomène de viscosité du fluide. Elle s'écrit comme suit :

✓ **Équation II-4** : $\sigma = \eta \left(\frac{d(\epsilon)}{dt} \right)$

Où $\frac{d(\epsilon)}{dt}$ est la vitesse de déformation, exprimée en s^{-2} , et η la viscosité en Pa.s.

Le fluide répond instantanément à une contrainte appliquée. Un fluide visqueux qui suit la loi de Newton avec une viscosité η constante est dit « fluide newtonien », (Figure II.2 (courbe b)).

Les fluides visqueux qui ne suivent pas rigoureusement la loi linéaire de Newton sont dits « Fluides non newtoniens ».

Lorsque η décroît avec l'augmentation de la vitesse de déformation, (Figure II.2 (courbe a)), le fluide est rhéofluidifiant ou pseudoplastique ; lorsque η augmente avec la vitesse de déformation, le fluide est rhéoépaississant, (Figure II.3 (courbe c)).

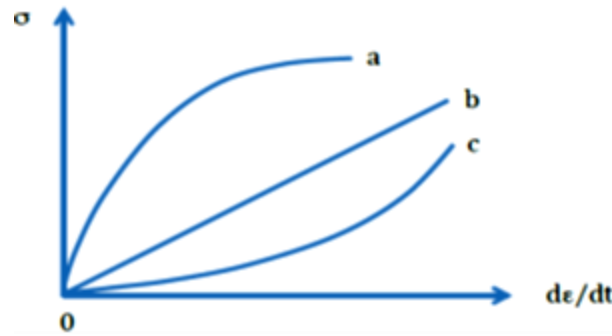


Figure II.2 : Réponses instantanées des fluides à une contrainte appliquée : a. fluide rhéofluidifiant ; b. fluide newtonien ; et c. fluide rhéoépaississant

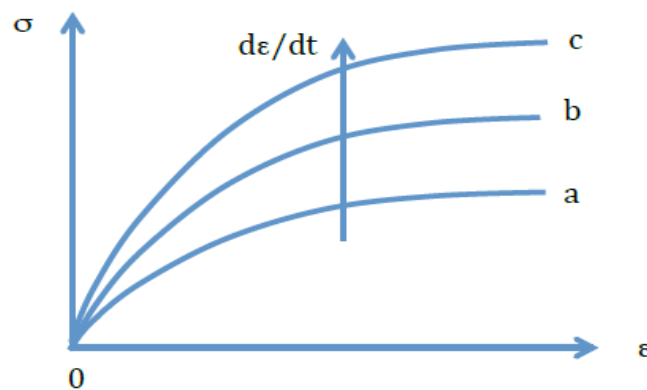


Figure II.3 : Réponses d'un matériau aux compressions uniaxiales réalisées avec la vitesse de compression croissante [21]

Les solides ont également une viscosité [21], mais elle est non newtonienne car les phénomènes élastique et plastique interviennent systématiquement. La viscosité des solides peut se visualiser clairement en traçant les courbes de contrainte-déformation (notées a, b et c sur la (Figure II.3) pour les valeurs croissantes de la vitesse de déformation. Plus la vitesse de déformation est élevée plus la contrainte nécessaire pour obtenir une déformation donnée est importante. Ce phénomène est la conséquence de la viscosité.

Selon la loi de Newton, la viscosité η dépend de la vitesse de déformation. Elle peut aussi dépendre de la température, de la façon d'exercer la contrainte (normale ou tangentielle), et de la pression [22].

Ordres de grandeurs : à la température ambiante, l'eau a une viscosité de 10^{-2} Pa.s, le sirop de maïs 10^2 Pa.s, le bitume 10^8 Pa.s, le verre fondu 10^{12} Pa.s [23] et le manteau terrestre de l'ordre de 10^{21} Pa.s [14].

Dans le cas de l'eau, la viscosité est à 10^{-4} Pa.s au-dessus de 50°C .

II.4.3 Plasticité et Seuil de Contrainte

La plasticité est une propriété spécifique des solides. Lorsque la contrainte atteint une valeur critique, dite « seuil de contrainte » σ_c , le solide idéal passe du régime élastique au régime plastique et se comporte comme un fluide visqueux. Lorsque la contrainte est supprimée, la déformation plastique ϵ_p est permanente et irréversible.

En fait, le seuil de plasticité doit être considéré comme une schématisation. Au-dessus du seuil, les déformations irréversibles deviennent beaucoup plus élevées que les déformations récupérables, alors qu'en-dessous, les déformations irréversibles peuvent être considérées comme négligeables.

La détermination directe du seuil de plasticité est quasiment impossible. Il s'agit plutôt d'une zone limite, dont les frontières sont très subjectives [15] [21] [24].

L'équation constitutive du comportement plastique s'exprime en deux temps, (Equation II.5). Avant d'atteindre le seuil de contrainte $\sigma < \sigma_c$, il n'y a pas d'effet plastique. Une fois que la contrainte atteint le seuil $\sigma \geq \sigma_c$, deux cas peuvent se manifester :

- la contrainte est immédiatement égale à σ_c , donc $\sigma_p = \sigma_c$, on parle alors d'un solide plastique idéal ;
- la contrainte continue d'augmenter, on dit que l'on a un durcissement par écrouissage en fonction de ϵ_p [3].

✓ **Équation II.5 :**

$$\begin{aligned} \sigma < \sigma_c \quad \sigma_p &= 0 \text{ et } \epsilon_p = 0 \\ \sigma \geq \sigma_c \quad \sigma_p &= 0 \text{ ou } \sigma_p = f(\epsilon_p) \end{aligned}$$

Où $f(\epsilon_p)$ est une fonction décrivant le comportement du durcissement par écrouissage.

Pour mettre en évidence les trois comportements élémentaires des matériaux idéaux, ils sont regroupés et présentés sur un même graphe (Figure II.4).

Il est supposé que les matériaux, initialement au repos, sont déformés à une vitesse de déformation constante à partir de l'instant $t = 0$, les contraintes sont tracées en fonction du temps.

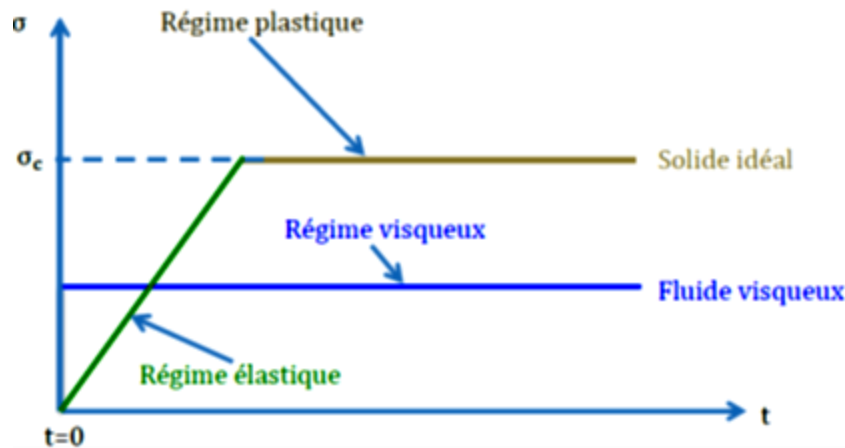


Figure II.4 : Réponses des matériaux idéaux à une vitesse de Déformation constante [14]

II.5 Comportements Rhéologiques Classiques

Les lois de Hooke, de Newton et de plasticité décrivent les trois comportements élémentaires des matériaux. Ils sont souvent combinés entre eux : viscoélastique, viscoplastique, élastoplastique et visco-élasto-plastique pour représenter les comportements des matériaux réels. Dans ce paragraphe, nous allons présenter les comportements souvent observés (« classiques ») en essais de caractérisation rhéologique.

II.5.1 Déformation Différée

Si une contrainte échelon est appliquée, (Figure II.5), et que la déformation continue à évoluer, on parle alors de déformation différée ou retardée. Le caractère différé est d'origine visqueuse. C'est le fluage de la déformation.

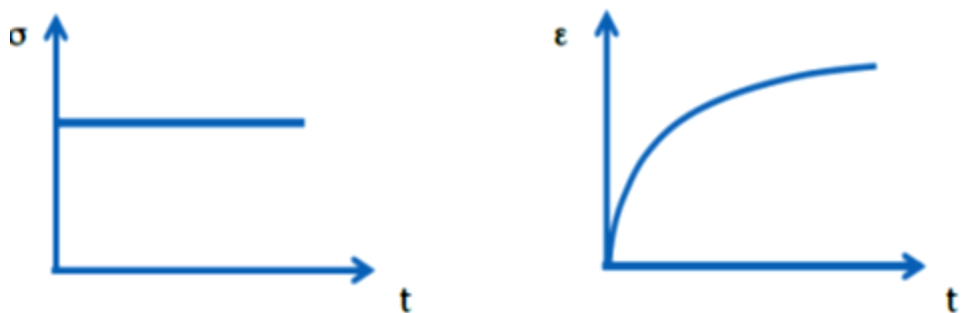


Figure II.5 : Comportement de déformation différée (retardée)

II.5.2 Relaxation

Lorsqu'une déformation est imposée et maintenue constante et que la contrainte diminue en fonction du temps, (Figure II.6), on parle de relaxation du matériau. Ce phénomène est également lié à la viscosité du matériau.

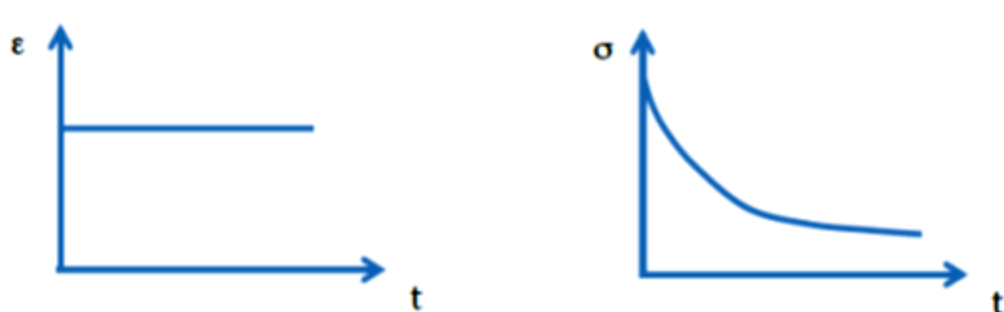


Figure II.6 : Comportement de relaxation

II.5.3 Recouvrement

Lorsqu'une contrainte est appliquée, maintenue constante pendant un certain temps (le temps nécessaire pour que la déformation atteigne une valeur constante) puis retirée, (Figure II.7), la déformation diminue soit instantanément, soit en différé. Il s'agit d'un recouvrement (ou d'une récupération) instantané ou différé du matériau. Lorsqu'il y a la déformation permanente, le recouvrement est partiel. La déformation résiduelle est liée à la plasticité du matériau.

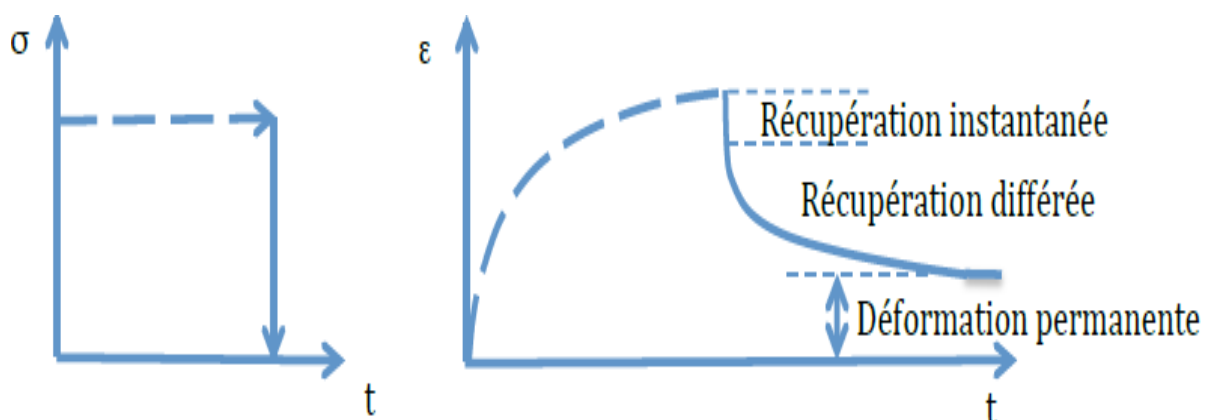


Figure II.7 : Comportements des recouvrements instantanés et différé

II.5.4 Hystérésis

Dans un essai cyclique de charge-décharge, la vitesse de déformation est imposée constante. Lorsque les courbes de contrainte-déformation en phase de charge (courbe a) et de décharge (courbe b) ne se superposent pas, (Figure II.8), il s'agit d'une hystérésis due à la viscosité ou à la plasticité du matériau.

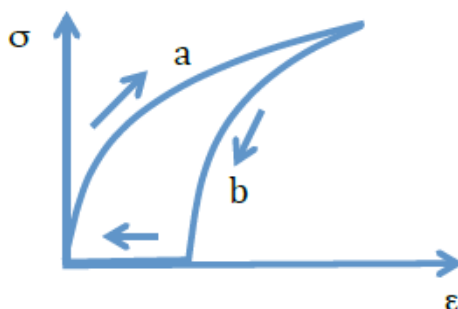


Figure II.8 : Comportement d'hystérésis

II.5.5 Écrouissage

L'écrouissage est l'ensemble des modifications des propriétés mécaniques d'un corps du fait des déformations plastiques. Le durcissement correspond à l'augmentation du seuil de plasticité pour des contraintes de même nature.

II.5.6 Thixotropie et rhéopexie

La thixotropie d'un corps se traduit par une viscosité qui diminue avec la durée d'écoulement, à contrainte appliquée constante.

Il s'agit d'un phénomène réversible, c'est-à-dire que, une fois la contrainte supprimée et après un repos suffisamment long, le corps revient à son état initial.

La rhéopexie est l'inverse de la thixotropie : la viscosité est une fonction croissante du temps sous contrainte.

Là aussi, le matériau revient à son état initial après que la contrainte soit retirée.

Ce phénomène est aussi connu sous le nom de l'antithixotropie.

II.6 Méthodes De Caractérisation Rhéologique

Il existe des méthodes très diverses pour caractériser les propriétés rhéologiques du matériau. Le principe de base de toutes les méthodes est de mesurer l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation ou l'inverse.

Le choix de la méthode de caractérisation est généralement basé sur l'état physique du matériau à étudier.

Nous avons évoqué les deux états principaux de la matière : solide et fluide. Pour un solide (par exemple, métaux et alliages ou élastomères et composites), les essais mécaniques de compression ou de traction sont les plus adaptés pour déterminer ses caractéristiques : l'élasticité, la limite d'élasticité, la déformation plastique, la rupture, etc.

Pour un fluide (par exemple, eaux et huiles ou solutions polymères et suspensions), les tests viscométrique et rhéométrique sous cisaillement sont les plus utilisés pour quantifier leurs propriétés élastiques, visqueuses ou seuils d'écoulement.

Entre le solide rigide qui se déforme très peu et le fluide très visqueux qui s'écoule largement, il existe une large gamme de matériaux aux propriétés mécaniques intermédiaires (par exemple, roches, sols, bitumes, huiles, boues, polymères, mousses, produits agroalimentaires, etc.).

Tous ces matériaux présentent des comportements rhéologiques très variés et très différents les uns des autres.

La différenciation basée sur l'état solide (dur ou mou) ou fluide (newtonien ou non newtonien) est donc loin d'être suffisante pour identifier les matériaux et trouver la méthode la plus pertinente pour la caractérisation.

Pour classer la pléthore de possibilité d'une façon évidente et simple, L. Bilmes [23] a proposé de différencier les matériaux par leurs comportements rhéologiques.

Toutefois, dans la littérature, les études rhéologiques sont spécialisées soit par domaines d'application (par exemple, produits agroalimentaires [21]), soit plus classiquement par la coulabilité des fluides (par exemple, liquide facilement coulable, liquide visqueux, fluide à seuil ou fluide pâteux), mais il n'y a pas de méthodologie élaborée pour les fluides très difficiles à mettre en écoulement ou pour les solides mous.

Ces travaux ne couvrent pas l'ensemble des particularités rhéologiques des matériaux réels ayant à la fois les propriétés du solide et celles du fluide.

CHAPITRE III : LES ESSAIS RHEOLOGIQUES EXISTANTS

III.1 Quelques essais rhéologiques existants

L'ouvrabilité d'un béton est la propriété déterminant l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité du béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité [24]. Pour décrire cette propriété du béton frais, on utilise également souvent les termes consistance et cohésion. Le premier est un indice de la mobilité (capacité de s'écouler) du béton frais, le seconde un indice de sa stabilité (capacité d'empêcher la ségrégation). Ce n'est que depuis quelques dizaines d'années qu'apparaissent des caractérisations plus précises, visant à déterminer des grandeurs apparentées aux paramètres de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité plastique).

L'essai rhéologique est toujours indispensable pour réaliser un ouvrage. Lors de la formulation du béton en laboratoire, il permet de prédire l'ouvrabilité du béton sur chantier. Au moment de la confection de l'ouvrage, il sert au contrôle-qualité, ce qui permet de prendre des mesures nécessaires avant la mise en place du béton, au cas où un accident aurait eu lieu en cours de fabrication. L'essai permet donc d'éviter ou de limiter au minimum la perte économique. On a inventé depuis longtemps de nombreux essais, essentiellement empiriques, pour évaluer l'ouvrabilité des bétons.

III.2 Essais Empiriques Pour Béton

En développant un système de métrologie rhéologique adapté à différentes sortes de bétons, plus de cent types d'appareils ont été inventés dans le monde [25], dont seulement quelques-uns, les plus utilisés, seront présentés ci-après. Parmi les appareils d'essai rhéologique empiriques, les plus connus au niveau international sont le cône d'Abrams et l'appareil V.B.

III.2.1 Essai D'étalement Au Cône D'abrams

L'essai au cône d'Abrams est un essai normalisé (ASTM C 143 ou NFP 18-451). On remplit un moule tronconique de 300 mm de hauteur en trois couches successives de béton (6 litres environ au total), piquée chacune 25 fois ; puis on démoule le cône et on mesure l'affaissement au centre original de la surface supérieure de l'échantillon (Figure III.1 III.2). Celui-ci varie de quelques millimètres, voire même zéro pour les bétons très secs (tel un béton routier) à une vingtaine de centimètres pour les bétons très fluides. En raison d'une sensibilité et d'une répétabilité mauvaise pour des bétons très secs et très fluides, cet essai ne convient a priori qu'aux bétons fermes à fluides.

Sa superbe simplicité fournissant une certaine qualité est toujours très appréciée jusqu'à aujourd'hui sur chantier comme dans les laboratoires. Cependant, le grand défaut de cet essai est que des bétons ayant les mêmes affaissements peuvent présenter des comportements rhéologiques très différents. Autrement dit, la relation entre l'affaissement au cône et l'ouvrabilité n'est pas toujours univoque. Ceci crée des problèmes plus ou moins graves sur chantier. Actuellement, cet essai est beaucoup utilisé pour contrôler la qualité du béton, d'une gâchée à l'autre et avec une formulation fixée. Une variation anormale de l'affaissement peut être causée par un changement inattendu de formulation ou de matériaux. Néanmoins, pour les travaux de techniques très avancées, il apparaît que la mesure de l'affaissement n'est pas suffisamment sensible. Quant à l'analyse des causes de variation, cet essai montre encore une fois ses limites.

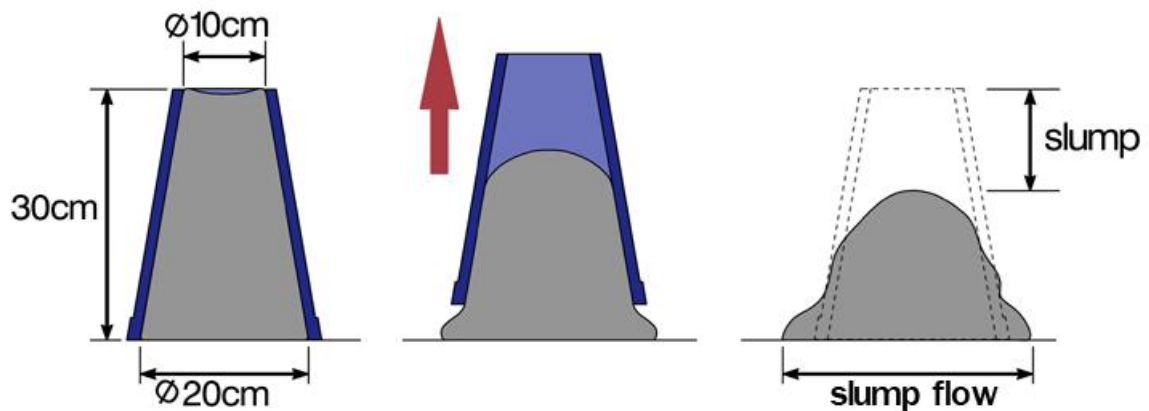


Figure III.1 : Le cône d'Abrams.



Figure III.2 : Le cône d'Abrams

III.2.2 Essai D'étalement (Slump Flow)

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des de béton sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure III.3 III.4 III.5). Le béton est introduit dans le cône sans compaction.

On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (6 litres) de béton.

Il est à noter que les recommandations internationales classent les bétons en trois catégories selon la valeur de l'étalement (SF : Slump Flow) :

- ✓ SF1 (550 - 650 millimètres) est approprié pour les structures en béton non renforcées,
- ✓ SF2 (660 - 750 millimètres) convient aux applications courantes (murs, colonnes),
- ✓ SF3 (760 - 850 millimètres) est employé pour des applications verticales en structures très encombrées, structures avec des formes complexes. [29]

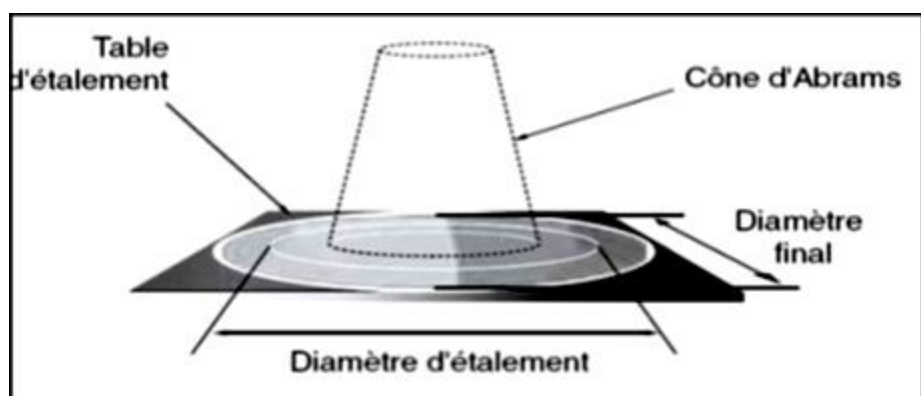


Figure III.3 Schéma de principe de l'essai d'étalement



Figure III.4 Essai d'étalement au cône d'Abrams

Il s'agit de démouler un cône normalisé (cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue. Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplaçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 600 mm et 750 mm centimètres. Pour la formulation vibrée (BO), c'est le test traditionnel de l'affaissement qui s'est substitué à celui de l'étalement.



Figure III.5 Essai d'étalement

III.2.3 Essai L'appareil V.B

Sous le nom "Vebe test", l'essai avec cet appareil est normalisé dans l'ACI Standard 211.3-75. Le schéma de l'appareil est présenté en (figure III.6) Un cône d'Abrams standard est placé dans un cylindre. Le cône est rempli de béton comme évoqué plus haut, puis le béton est démoulé. Un couvercle en verre de surface légèrement inférieure à celle du cylindre est ensuite placé au-dessus du béton. On applique une vibration de fréquence 50 Hz, d'accélération maximale égale à 3 à 4 fois celle de la pesanteur. Le temps pour que le béton soit remoulé de sa forme tronconique affaissée à la forme du cylindre est mesuré. Ce temps est considéré comme l'indication de la consistance du béton. Dans le cas où le volume du béton est changé de V_1 à V_2 , le temps doit être corrigé en le multipliant par un facteur V_1 / V_2 . Par rapport aux autres appareils, cet appareil de laboratoire convient particulièrement aux bétons secs.

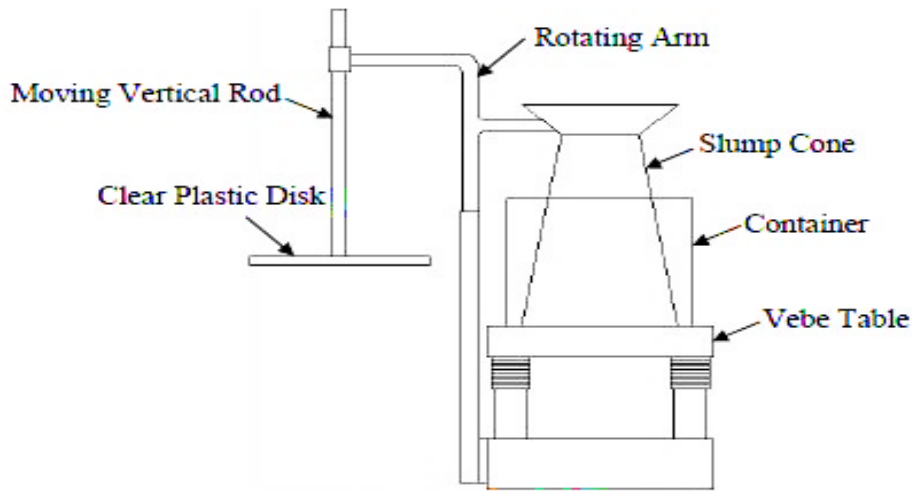


Figure III.6 L'appareil V.B [37]

III.2.4 Essai de la Table a Secousses

L'essai de la table à secousses est normalisé dans la norme allemande DIN 1048 : TOME I. Une table de 700 mm de côté, composée d'une plaque en bois recouverte par une autre plaque en acier, dont la masse totale est de 16 kg, est articulée le long d'un côté avec une autre table de même dimension, servant de socle. Tout en basculant autour du côté articulé, la table supérieure peut être soulevée d'au maximum 40 mm, mise en butée par un système : elle tombe et frappe le socle quand elle est lâchée. Un cône de 200 mm de hauteur, 200 mm de diamètre en bas et 130 mm de diamètre en haut (volume 4,3 litres), est mis au milieu de la table, rempli de béton et puis retiré. Après 15 secondes d'attente, la table est soulevée, puis lâchée. Elle tombe alors librement. Cette procédure est effectuée 15 fois en 15 secondes. Les étalements maximaux parallèles aux deux côtés de la table sont ensuite mesurés. La valeur moyenne de ces deux mesures est considérée comme représentative de l'ouvrabilité du béton. La simplicité de cet essai lui permet d'être utilisé sur chantier. Parmi les appareils de chantier, l'avantage de celui-ci est son aspect dynamique, ce qui convient particulièrement aux bétons relativement visqueux, comme le sont souvent les BHP.



Figure III.7 Table à secousses

III.2.5 Essai Le Maniabilimètre L.C.L

L'essai au maniabilimètre est normalisé dans la norme NFP 18-452. Une caisse métallique parallélépipédique à l'extrémité de laquelle est fixé un vibreur, est séparée en deux compartiments par une trappe mobile. 30 litres du béton sont versés dans le compartiment le plus éloigné du vibreur (notons qu'il existe encore une "version mortier" ayant un volume de 1 litre pour les mortiers et bétons dont les dimensions des granulaires sont inférieures à 15 mm).

L'enlèvement de la trappe met automatiquement en route le vibreur. Le béton s'écoule sous l'effet de la vibration, et le temps nécessaire pour que le béton atteigne un repère tracé sur la paroi, côté vibreur, est considéré comme l'indication de la maniabilité (Figure III.8). Il varie de quelques secondes à une minute. Cet appareil convient surtout aux bétons relativement secs du fait qu'il s'agit d'un essai dynamique. La taille considérable de l'appareil (version béton) garantit une excellente répétabilité. Le mode d'emploi est simple. Apprécié pour ses avantages, le maniabilimètre L.C.L. pour les bétons fluides, les temps d'écoulement ne sont pas très significatifs. Par ailleurs, son encombrement l'empêche d'être largement utilisé sur chantiers.



Figure III.8 Le maniabilimètre L.C.L.

III.2.6 Essai au Le wattmètre

Le wattmètre est plutôt un moyen d'apprécier l'ouvrabilité des bétons qu'un essai rhéologique. Dans certaines centrales à béton, on ajuste parfois le dosage en eau pendant la fabrication pour que la puissance dissipée par le moteur, mesurée par le wattmètre, soit la même que celle fixée comme objectif, correspondant à un béton ayant une ouvrabilité demandée. En admettant que le malaxeur fonctionne à vitesse imposée, pour des bétons ayant un comportement linéaire, comme celui des fluides newtoniens, la puissance est une indication directe du comportement des matériaux. Plus le béton est fluide, plus le malaxage est facile. Par contre, pour des bétons ayant des comportements différents de celui des fluides newtoniens, la même puissance exigée par différents bétons n'implique pas forcément que ces derniers aient des caractéristiques rhéologiques identiques.

III.2.7 Essai L'Orimet test

C'est un essai conçu spécialement pour des bétons qui doivent rester stables sous l'eau. Ces bétons sont un peu particuliers : ils ont d'une part des valeurs de slump très élevées ; d'autre part, ils ont une cohésion beaucoup plus élevée que des bétons ordinaires ayant également des valeurs de slump élevées. Ce dernier caractère provient de l'utilisation d'adjuvants chimiques spécifiques, afin d'éviter le délavage du béton. BARTOS [28] a mis au point cet essai, utilisable sur chantier, en vue de distinguer les bétons stables sous l'eau des bétons fluides ordinaires. L'équipement comprend un tube vertical de 7,5 litres environ de volume, dans lequel on met du béton sans aucun compactage. Il y a un ajutage, interchangeable, en bas du tube. Une plaque mobile servant de porte est bloquée avant l'essai afin de boucher l'ajutage. Le tube est supporté par un tripode, lequel est installé sous le corps du tube, et abattable pendant le transport. Un récipient du 10 litres environ de volume est mis au-dessous de l'ajutage pour récupérer le béton écoulé. L'essai commence par l'ouverture rapide de la porte, en même temps que l'on déclenche un chronomètre de précision 0,2 seconde. On mesure le

temps jusqu'auquel on voit la lumière à travers le tube. Ce temps d'écoulement est un indice rhéologique de l'essai. Il peut varier de 5 secondes à l'infini (écoulement partiel). Dans la pratique, on considère comme écoulement partiel ceux donnant des temps d'écoulement au-dessus de 60 secondes. On répète en général 2 à 3 fois l'essai, avec des échantillons différents, pour caractériser chaque béton. Les résultats de l'auteur montrent que cet essai est sensible et pratique pour identifier les bétons stables sous l'eau.

III.2.8 Essai de boîte en L (L- box test)

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure suivante La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute .on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage .une fois l'écoulement terminé on mesure les deux hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 .le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieure à 0,8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation. [27]

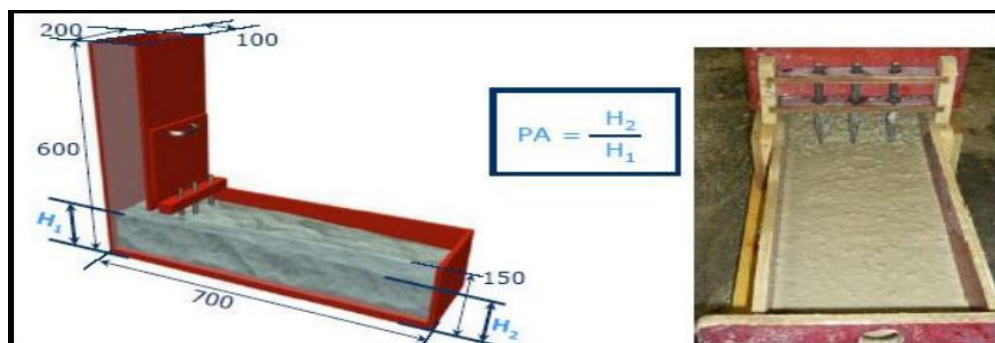


Figure III.9 Essai de la boîte en L (dimensions)



Figure III.10 : Essai de la boîte en L

III.2.9 Essai De Stabilité Au Tamis

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique : descente des gros gravillons par l'effet de la gravité et remonté de la pâte qui est légère. De plus par cet essai on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire, soit dans les 15 minutes après la gâchée.

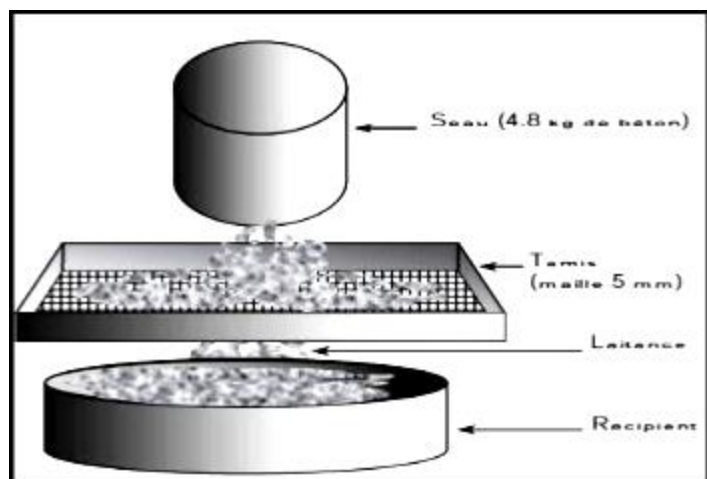


Figure III.11 L'essai de stabilité au tamis.

Cet essai vise à quantifier le risque ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de biote en L.

On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5mm, une masse de 4,8Kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance. [27]

$$P_i = \frac{\text{plaitance}}{p_{\text{chantillon}}} \times 100$$

Deux classes sont définies (NF EN 206-9) :

- ✓ SR1 : Laitance $\leq 20\%$
- ✓ SR2 : Laitance $\leq 15\%$



Figure III.12 L'essai de stabilité au tamis.

III.3 Essais Viscosimètres à cylindres coaxiaux

Les essais empiriques, offrant très généralement une seule grandeur, ne peuvent traduire, à leur manière, qu'une seule facette du comportement rhéologique du béton frais [31]. Ces indices ne sont souvent pas liés directement aux caractéristiques intrinsèques des matériaux. Néanmoins, il existe un certain nombre d'essais qui visent à mesurer ces dernières. On utilise beaucoup les viscosimètres capillaires pour des fluides très peu visqueux. Pour des produits un peu plus visqueux, on utilise plutôt des viscosimètres à rotation. Pour ces derniers, différents types existent : écoulement entre deux plans horizontaux, entre un plan horizontal et un cône perpendiculaire, et entre deux cylindres coaxiaux. Les deux premiers types n'ont en principe pas de parois latérales. Cela ne pose pas trop de problème pour des matériaux de particules extrêmement fines dont l'effet de paroi est mis hors de question, ce qui permet d'utiliser un entrefer assez petit. Quant aux matériaux de particules plus grosses, comme la pâte de ciment, l'utilisation obligatoire d'un grand entrefer rend difficile le maintien de l'éprouvette dans l'espace. Dans ce cas, on utilise le viscosimètre à cylindres coaxiaux. Par ailleurs, ce dernier appareil est le seul type, jusqu'à aujourd'hui, qui ait été appliqué au béton. Nous allons donc décrire un peu plus en détail ce type d'essai.

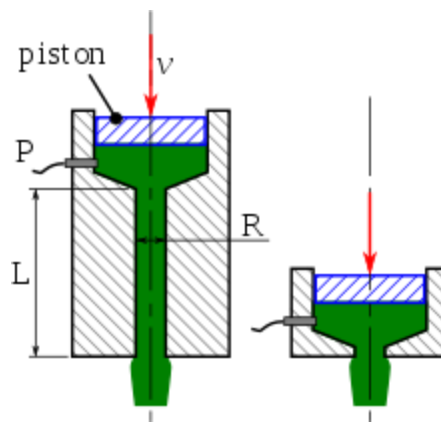


Figure III.13 L'essai viscosimètre

III.3.1 Bases théoriques

Le principe du viscosimètre à cylindres coaxiaux est de forcer le fluide à s'écouler dans l'espace annulaire compris entre deux cylindres coaxiaux dont l'un tourne, et l'autre est fixe. La (figure III.13) schématise un viscosimètre à cylindres coaxiaux. On impose des vitesses de rotation constantes et on mesure les couples correspondants : on travaille à "gradient de vitesse imposé", ou

l'inverse : on travaille à "contrainte imposée". Le grand intérêt de cet appareil est qu'avec plusieurs mesures, on peut tenter de déterminer des paramètres intrinsèques au matériau. Si l'écoulement est laminaire et permanent, et s'il n'y a pas de glissement entre le béton et les parois verticales, la contrainte de cisaillement d'une surface cylindrique du rayon r dans l'échantillon peut être calculée par :

- **Équation III -1 :**
$$\tau = \frac{\Gamma}{2\pi hr^2}$$

Où h est la hauteur de l'échantillon, et Γ le couple entraînant la rotation du cylindre. Théoriquement, pour un échantillon de matériau binghamien, et pour un couple donné, il existe un rayon critique r_c au-dessus duquel le matériau cesse de s'écouler ou s'écoule en bloc : on parle d'écoulement piston ("plug flow" en anglais). Ce rayon critique s'exprime sous la forme :

- **Équation III-2 :**
$$r_c = \sqrt{\frac{\Gamma}{2\pi h\tau_o}}$$

Au cas où l'écoulement a lieu dans tout le volume de l'échantillon, c'est-à-dire le rayon du cylindre extérieur R^2 est inférieur à r_c , on obtient pour un matériau binghamien l'équation de Reiner-Rivlin suivante :

- **Équation III-3 :**
$$\Omega = \frac{\Gamma}{2\pi h\mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) - \frac{\tau_o}{\mu} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

Où Ω , est la vitesse angulaire du cylindre, et R_1 le rayon du cylindre intérieur. Par contre, dans le cas $R_2 > R_c$, une autre équation doit être obtenue :

- **Équation III-4 :**
$$\Omega = \frac{\Gamma}{4\pi h R_1^2 \mu} - \frac{4\pi h R_1^2 \tau_o}{2\mu} \left(1 - \ln \frac{\Gamma}{2\pi h R_1^2 \tau_o} \right)$$

(La figure III.14) montre la relation entre Ω et Γ dans toute la gamme de vitesse angulaire. Alors que le segment de droite AB est décrit par l'équation de Reiner-Rivlin, le segment courbe BC est caractérisé par (Equation III-4). Sur cette figure, Γ_o est le couple minimal pour démarrer la rotation du cylindre, dit couple au démarrage ; Γ_o le couple obtenu par l'extrapolation du segment droit AB vers l'axe du couple, c'est par ailleurs à partir de ce couple qu'on calcule le seuil régressé ;

Γ_c le couple minimal pour supprimer l'écoulement piston. Ces trois couples sont exprimés par les équations suivantes :

- Équation III - 5 : $\Gamma_{r_0} = 2\pi h R_1^2 \tau_0$
- Équation III - 6 : $\Gamma = \frac{2\pi h R_1^2 R_2^2 \ln \frac{R_1}{R_2}}{R_1^2 - R_2^2} \tau_0$
- Équation III - 7 : $\Gamma_0 = 2\pi h R_2^2 \tau_0$

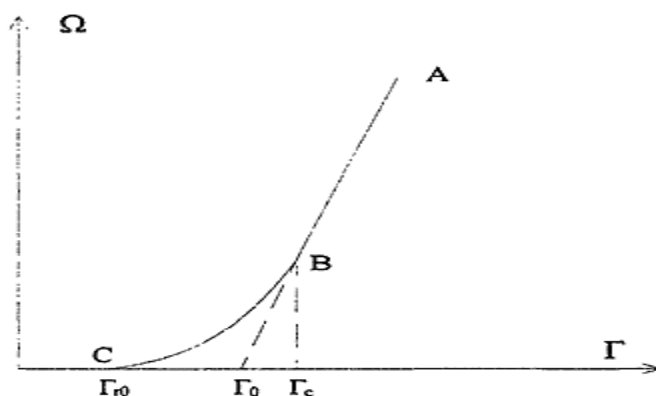


Figure III.14. Relation entre vitesse angulaire et couple exercé dans un viscosimètre pour un corps binghamien.

Nous notons que pour des fluides newtoniens, n'ayant donc pas de seuil de cisaillement, une seule équation régissant tout le domaine des mesures élimine toute ambiguïté :

- Équation III - 8 : $\Omega = \frac{\Gamma}{4\pi h \mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right)$

Cela nous permet de trouver la viscosité du matériau. C'est par ailleurs la raison pour laquelle On appelle ce type d'appareil "viscosimètre".

- Équation III - 9 : $\frac{R_2}{R_1} \approx 1$

On peut considérer approximativement que la contrainte et le gradient de vitesse sont homogènes dans tout le corps, et valent en moyenne $\tau_m \gamma$ et γ_m calculées par les formules suivantes:

- Équation III - 10 : $\tau_m = \frac{\Gamma}{2\pi h \mu R_m^2}$

- **Équation III - 11 :** $\gamma_m = \frac{\Omega R_m}{e}$

Où R_m est le rayon moyen des deux cylindres. Ceci permet donc d'obtenir directement le rhéogramme (courbe liant la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse).

En fait, la distance e doit être déterminée en prenant en compte l'effet de paroi, ce qui impose une dimension minimale d'éprouvette, en général d'au moins cinq fois le diamètre de la plus grosse particule $\Phi_{\max}$ [32] :

- **Équation III - 11 :** $R_2 - R_1 \geq 5 \Phi_{\max}$

La condition (III - 11) n'est pas très critique pour des suspensions de particules très fines, comme celles des pâtes de ciment. Ainsi un grand nombre d'appareils a été développé pour la pâte de ciment, comme les appareils BOMBLED en France, MERRILBROOKPIELD en Grande-Bretagne, AGFA en Allemagne, DRAGE en Suisse, POLARAD, STORMER, FANN aux Etats-Unis. Certains appareils ont même été normalisés [33].

III.3.2 Mesure en Contrainte Tangentielle – Cisaillement

Les rhéomètres rotatifs sont des appareils spécialement conçus pour mesurer la viscosité d'un milieu. Le principe des rhéomètres rotatifs consiste à réaliser le cisaillement entre deux surfaces solides, (Figure III.15), dont l'une est immobile (parties noires) et l'autre en rotation (parties raillées).

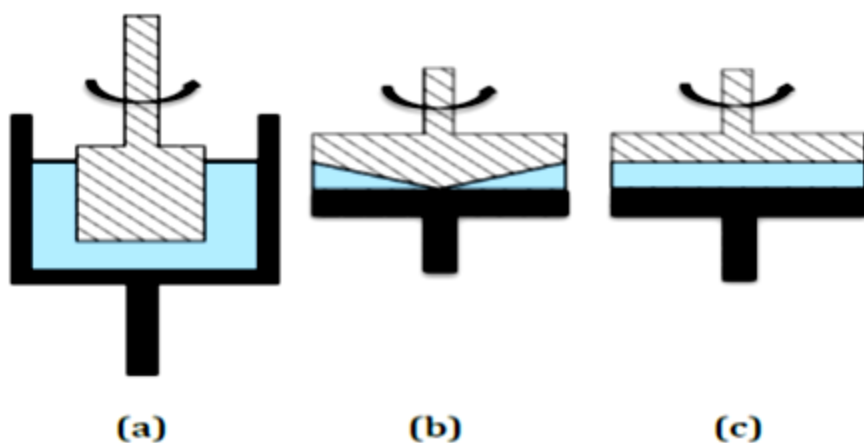


Figure III.15 Géométries des rhéomètres rotatifs : (a) cylindre-cylindre (cylindres coaxiaux) ; (b) cône - plateau ; (c) plateau-plateau [5]

La méthode de mesure est basée directement sur la définition de la viscosité, (Equation III-11) : la viscosité est calculée à partir des mesures de la contrainte (obtenue elle-même à partir du couple de rotation) et de la vitesse de déformation (obtenue à partir de la vitesse de rotation) [33]. En imposant le couple de rotation, la vitesse de rotation ou l'angle de rotation, la rhéométrie rotative permet de faire les mesures en écoulement, en oscillation, en fluage ou en relaxation. En plus de la viscosité, cette méthode permet aussi de mesurer des propriétés, comme le seuil d'écoulement.

Le rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux, (Figure III.15 (a)), est également connu sous le nom de rhéomètre de Couette. Il s'agit du viscosimètre le plus précis pour des mesures absolues. Il est aussi le plus proche de la théorie. Toutefois, pour garantir un écoulement homogène, l'entrefer des deux cylindres est très petit. Il n'est pas adapté pour étudier les fluides contenant des particules de grandes tailles ou très difficiles à mettre en écoulement.

Le rhéomètre à cône-plateau, (Figure III.15 (b)), est très précis pour des liquides de très faibles viscosités. Le cône étant situé très près du plateau, il ne convient pas, non plus, aux fluides contenant des particules de grandes tailles.

Le rhéomètre à plateau-plateau, (Figure III.15 (c)), est très utilisé pour des solutions hétérogènes de forte concentration ou possédant de grosses particules, car le problème d'entrefer n'est plus à prendre en compte.

Le rhéomètre à cylindre-palettes est aussi souvent adopté pour mesurer les suspensions hétérogènes [38]. Il fonctionne selon le même principe que le rhéomètre de Couette. L'avantage de ce dispositif est de rendre homogène les suspensions par l'agitation des palettes au cours de la mesure.

III.3.3 Choix du rhéomètre en fonction de l'application

Tableau III.1 Le tableau l'influence de la géométrie du dispositif sur la mesure

Paramètre \ Type	Couette à cylindres coaxiaux	Plan-plan	Cône-plan
Diamètre $\varnothing$ (mm)	Cylindre : de 20 mm à quelques cm	Plan : 20 - 60	Cône : 20 - 60
Entrefer h (mm)	De 0,1 à quelques mm	0,2 - 3	Dépend de θ ($\leq 4^\circ$) et du $\varnothing$ du cône
Volume d'échantillon (ml)	Important	Faible	Faible ($\sim 0,5 - 2$)
Inerties mécanique et thermique	Élevées	Faibles	Faibles
Taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) dans le volume de [3] mesure	Quasi-constant si h est faible devant le rayon des cylindres $\Rightarrow$ mesure de η absolue possible	Variable $\Rightarrow$ mesure de η relative	Quasi-constant $\Rightarrow$ mesure de η absolue possible
Forts taux de cisaillement (vitesses de rotation élevées)	Non (à cause de l'inertie)	Oui si h faible	Oui si θ faible
Gamme de fréquence en oscillation	Basses fréquences uniquement (à cause de l'inertie)	Large $\Rightarrow$ <i>rhéomètre dynamique</i> (mesures avec $h < 1$ mm)	Large $\Rightarrow$ <i>rhéomètre dynamique</i>
Mesures de faibles η	Oui (surface de contact élevée $\Rightarrow$ bonne sensibilité)	Possible avec plan $\varnothing$ 60	Possible avec cône $\varnothing$ 60
Mesures de fortes η	Non	Avec plan $\varnothing$ 20	Avec cône $\varnothing$ 20
Mesures sur échantillons avec des grosses particules/charges	Oui si h élevé (petit mobile dans un grand godet)	Oui si h élevé	Non (entrefer faible au niveau de la troncature)
Facilité d'emploi	Variable (peut être difficile à nettoyer)	Oui	Oui

III.4 Essais Sonde Viscoprobe

La sonde Viscoprobe est utilisée industriellement pour déterminer en ligne la variation des paramètres rhéologiques de bétons autoplaçants entre des gâchées réputées identiques [33]. La force de trainée s'exerçant sur la sonde immergée dans le béton lors du malaxage est mesurée.

Le système est généralement installé dans le malaxeur sur l'étoile de malaxage en remplacement d'une pale. Le mouvement épicycloïdal (Figure III.16 (a)) fournit alors la variation de vitesse nécessaire à une mesure rhéologique. Etant montée sur l'étoile de malaxage, la sonde voit sa vitesse relative par rapport au béton évoluer entre une vitesse minimale et une vitesse maximale.

En conséquence, l'effort de trainée mesuré par la sonde oscille également entre une valeur minimale et une valeur maximale. En présence d'un malaxeur annulaire, il convient d'utiliser deux sondes placées à deux rayons différents afin d'évaluer l'effort de trainée induit par deux vitesses de translation différentes. L'installation de la sonde Viscoprobe sur le train valseur des malaxeurs planétaires est la plus courante.

La sonde est composée d'une boule sphérique d'un diamètre de 10 cm portée par un bras cylindrique de 32 cm de longueur et de 3,4 cm de diamètre (Figure III.16 (b)).

Nous définissons le « rayon » de la sonde comme la moitié de la largeur maximale de la sphère. La hauteur de la partie immergée de la sonde correspond à la fois à la hauteur de la partie sphérique et de la partie du bras immergée. Une jauge de déformation intégrée au niveau de la partie supérieure du bras de la sonde est calibrée pour mesurer l'effort d'avancement dans le béton.

Lors de nos essais, c'est une des pales de mi-hauteur de l'étoile de malaxage qui est remplacée par la sonde Viscoprobe. La distance au centre du train valseur est de 30 cm. L'extrémité basse de la boule métallique se trouve à 5 cm du fond du malaxeur.

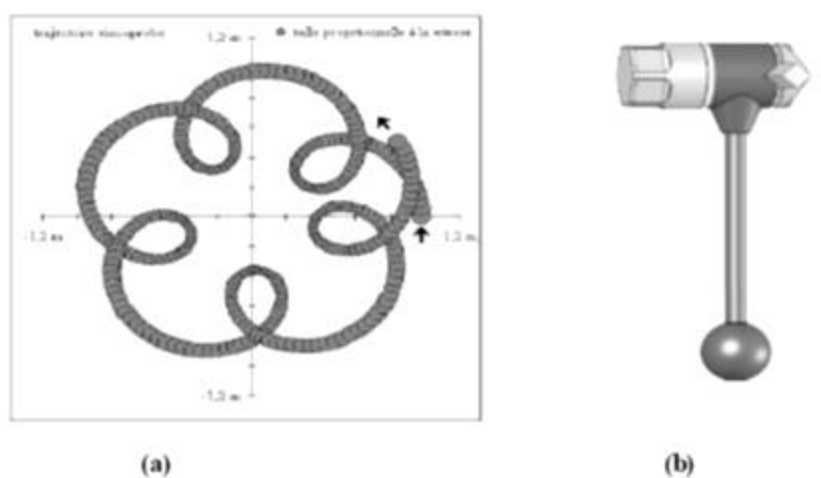


Figure III.16 La trajectoire de la sonde Viscoprobe dans le malaxeur (a) ; la sonde Viscoprobe (b)

La jauge de déformation transmet l'amplitude de la force mesurée par ondes électromagnétiques (Wifi) à un modem placé sur le capot du malaxeur. Ce dernier assure le transfert des informations, par l'intermédiaire d'un boîtier d'acquisition, au logiciel de traitement des données. Le logiciel enregistre l'effort de trainée exercé par le béton sur la sphère durant tout le cycle de malaxage (Figure III.16). La fréquence d'acquisition des données est de 150 Hz environ.



Figure III.17. Chaîne de mesure de la sonde Viscoprobe

Le logiciel propose un traitement des données qui revient à considérer que :

- la viscosité plastique est proportionnelle au ratio des amplitudes des variations de vitesse et d'effort de trainée de la sonde, en considérant les positions correspondant aux vitesses maximum et minimum :

- **Équation III-12 :**
$$\mu_{pL} = \frac{1}{6\pi R_{visco}} \frac{\Delta F}{\Delta V}$$

- le seuil de cisaillement est lui relié à la force moyenne, la vitesse moyenne et la F viscosité plastique de la manière suivante : V_{moyen}

- **Équation III-13 :**
$$\tau_o = \frac{F_{moyen}}{12\pi R_{visco}^2} - \frac{\mu_{pL} V_{moyen}}{R_{visco}}$$

Avec : R : Rion de la sonde Viscoprobe

V : vitesse de la sonde Viscoprobe

Ces relations sont déduites en considérant les relations de type Stokes de la force moyenne en fonction de la vitesse de la sonde par rapport au malaxeur et en faisant l'hypothèse que le taux de cisaillement moyen autour de la sphère est égale à V_{visco} / R_{visco} . Cependant, dans le logiciel les coefficients intervenants dans ces relations sont choisis arbitrairement de manière à afficher des

valeurs « crédibles » des paramètres identifiés en présence d'un béton de référence. Il ne s'agit donc pas d'une véritable mesure rhéologique. Avec cette exploitation des données, la sonde permet malgré tout de constater si la viscosité plastique et le seuil de cisaillement augmentent ou diminuent entre des gâchées successives.

L'interface graphique du logiciel est présentée (Figure III.18). Elle est composée de 3 graphiques et d'un tableau de valeurs. Le graphique du premier quart gauche permet d'observer l'évolution des forces de trainée maximales et minimales sur une rotation du train valseur en fonction du temps de malaxage. Le graphique à sa droite correspond à la courbe d'écoulement du béton (contrainte en fonction du taux de cisaillement). L'évolution de la rhéologie du béton frais pendant le malaxage, à savoir la variation du seuil de cisaillement en fonction de la viscosité plastique, est présentée sur le quart inférieur gauche. Le tableau de contrôle de la sonde et de la valeur crédible des paramètres rhéologiques du béton de référence sont présentés sur la (Figure III.18) sur la partie inférieure droite.

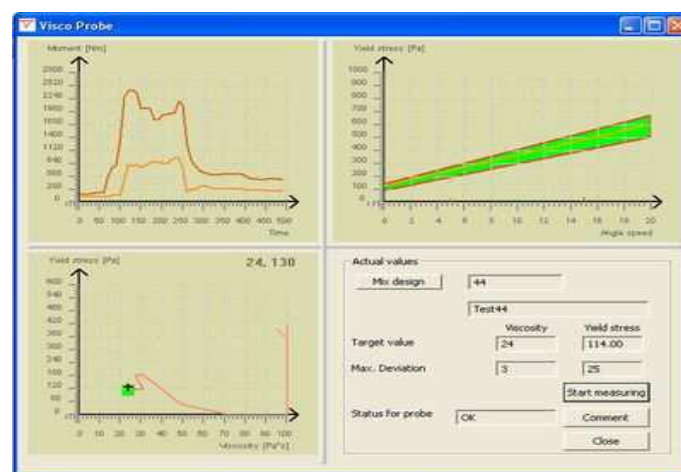


Figure III.18 Logiciel d'analyse des résultats rhéologiques de la sonde Viscoprobe

III.4.1 Vitesse dans la direction de mesure de la force

Les notations suivantes sont utilisées (figure III.19) :

- R_1 , distance entre le centre du malaxeur et le centre du train valseur et R_2 distance entre le centre du train valseur et la sonde Viscoprobe ;
- $\alpha = \omega_1 t$ (où ω_1 est la vitesse de rotation principale) et $\beta = \omega_2 t$ (où ω_2 est la vitesse de rotation du train valseur) ;
- $\vec{a}$ est le vecteur unitaire de la direction de mesure de la force de trainée (perpendiculaire au rayon du train valseur).

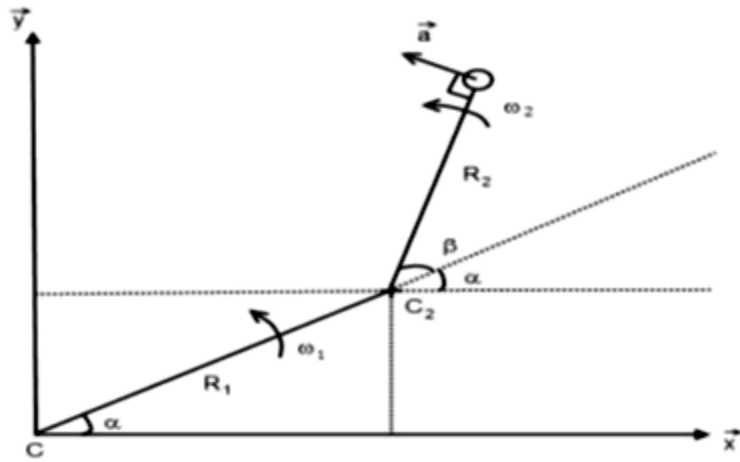


Figure III.19 Schéma explicatif pour le calcul de la vitesse de la sonde dans le malaxeur

A partir des composantes du vecteur de position de la sonde r_x et r_y par rapport au centre du malaxeur :

$$r_x = R_1 \cos(\omega_1 t) + R_2 \cos(\omega_1 t + \omega_2 t) ; r_y = R_1 \sin(\omega_2 t) + R_2 \sin(\omega_1 t + \omega_2 t)$$

L'expression des composantes de la vitesse v_x et v_y est obtenue en dérivant par rapport au temps :

$$V_x = -R_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t) - R_2 (\omega_1 + \omega_2) \sin(\omega_1 t + \omega_2 t)$$

$$V_y = R_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t) + R_2 (\omega_1 + \omega_2) \cos(\omega_1 t + \omega_2 t)$$

La direction de mesure de la force de trainée est donnée par les composantes du vecteur a_x et a_y qui s'expriment par :

$$a_x = -\sin(\omega_1 t + \omega_2 t) ; a_y = \cos(\omega_1 t + \omega_2 t)$$

L'expression de la vitesse de la sonde Viscoprobe dans la direction de mesure de la force de trainée est alors le produit scalaire entre la vectrice vitesse et le vecteur $\vec{a}$:

$$V_{\text{Visco}} = v_x a_x + v_y a_y = R_2 (\omega_1 + \omega_2) + R_1 \omega_1 \cos(\omega_2 t)$$

Les vitesses minimales et maximales de la sonde Viscoprobe dans la direction de mesure de la force de trainée sont donc :

$$V_{\text{max}} = R_2 (\omega_1 + \omega_2) + R_1 \omega_1 \text{ et } V_{\text{min}} = R_2 (\omega_1 + \omega_2) - R_1 \omega_1$$

Dans la configuration de nos essais, les valeurs de $V_{\max}$ et $V_{\min}$ (en position extérieure et intérieure de la sonde Viscoprobe) sont respectivement 1,90 m/s et 1,02 m/s, pour la vitesse nominale du malaxeur. Ces vitesses évoluent proportionnellement avec la variation de la vitesse du malaxeur.

Ayant obtenu l'expression de la vitesse de la sonde Viscoprobe, il faut déterminer la force de trainée mesurée lors du malaxage du béton.

III.4.2 Calibrage

La relation entre le signal brut de la sonde Viscoprobe (nommé « couple », C_{Visco}) et la force correspondante est déterminée en imposant une force par des poids suspendus à la sonde de façon à solliciter le bras support de la sonde en flexion comme indiqué sur la (figure III.20(a)). Le résultat de calibrage est présenté sur la (figure III.20(b)). La relation reliant la force de trainée F s'exerçant sur la sphère et le couple mesuré sur la sonde C_{Visco} est :

$$F = \frac{C_{\text{Visco}} - 223.6}{4.9}$$

Avec un coefficient de détermination très proche de 1 ($R^2 = 0,9992$). La valeur 223,6 correspond à l'offset de la sonde Viscoprobe.

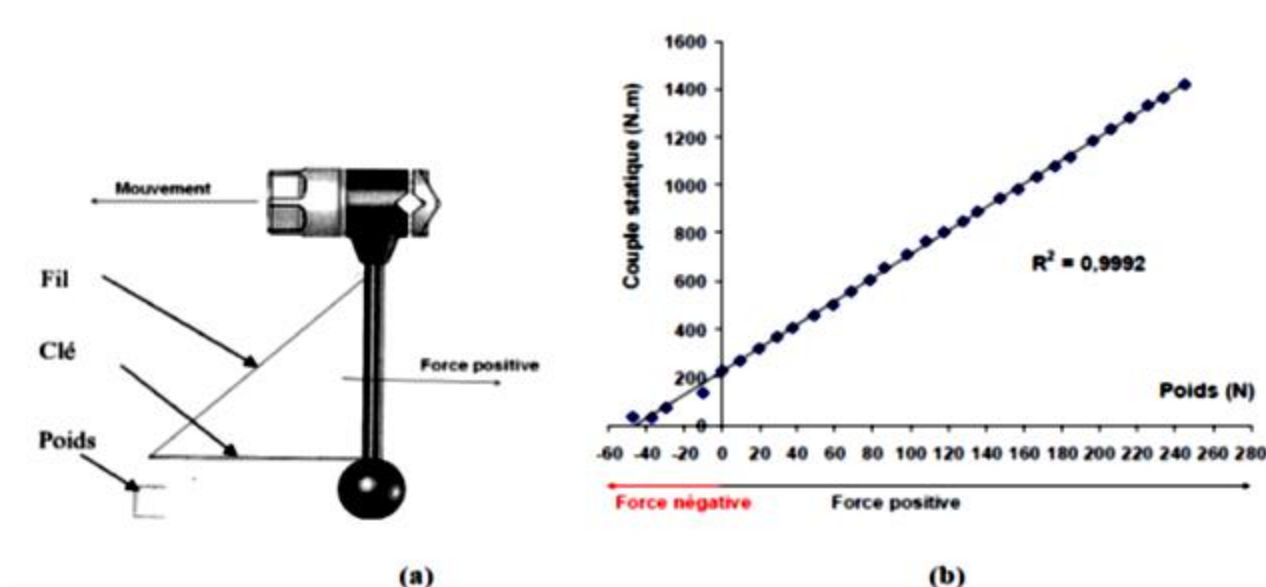


Figure III.20 Vérification du dispositif de mesure par un calibrage de la sonde Viscoprobe (a) ; Courbe de calibrage : forces dans le sens de l'avancement de la sonde (force positive) et dans le sens contraire l'avancement de la sonde (force négative) (b)

CHAPITRE IV : ETUDE DE PROPRIETES RHEOLOGIE DE LA PATE DE CIMENT ET DU BETON

IV.1 Pâte De Ciment, Béton Ordinaire Et Béton Fluide

La pâte de ciment est un mélange relativement simple, composé de grains de ciment et d'eau. L'étendue granulaire de ciment varie de quelques unités à une centaine de microns, La gamme courante du rapport eau sur ciment E/C est de 0,30 à 0,85 environ [35].

Par ailleurs, on peut mettre dans la pâte certains ajouts minéraux comme des fillers, des cendres volantes, des fumées de silice, etc..., afin d'obtenir des propriétés spécifiques. Ces produits finaux sont aussi appelés coulis.

Le béton est cependant un matériau plus complexe. Il est constitué de plusieurs composants, dont les principaux sont ciment, granulat et eau. Le rapport E/C du béton ordinaire peut varier de 0,4 à 0,8 [37].

Les ajouts minéraux décrits plus haut peuvent également être utilisés dans le béton pour le même objet que celui de la pâte. Il arrive aussi parfois qu'on ajoute des adjuvants chimiques pour améliorer l'ouvrabilité ou modifier les durées de différentes périodes de l'évolution chimique des bétons. Le béton ordinaire est souvent assez ferme. L'affaissement au cône est généralement inférieur à 15 cm, voire nul pour certains bétons.

L'augmentation continue du coût de la main d'œuvre à notre époque crée une demande de plus en plus forte d'amélioration de l'ouvrabilité des bétons pour les ouvrages d'art. Ainsi est apparue récemment une nouvelle gamme de bétons fluides : les bétons à hautes performances (BHP).

Ces bétons présentent beaucoup d'avantages : haute résistance, haut module d'élasticité, peu de ressuage, peu de fluage, haute durabilité, etc. [38]. L'affaissement au cône de ce type de bétons est en général supérieur à 15 cm. La spécificité la plus importante de la formulation de ces bétons est sans doute l'utilisation de super plastifiant. Ceci conduit à un rapport E/C très faible, variant de 0,3 à 0,4, parfois moins [37].

Par ailleurs, on emploie fréquemment un ajout minéral : la fumée de silice. Malgré l'affaissement élevé des BHP, ces derniers présentent un aspect visqueux, qui provoque parfois de mauvaises performances au pompage sur chantier.

A l'heure actuelle, la difficulté de maîtriser la rhéologie des BHP semble être une des limitations quant à leur utilisation. Actuellement, les bétons "autonivelants" sont en développement [39].

L'un des avantages importants de ce type de bétons serait de permettre de supprimer la vibration pendant la mise en place des bétons frais, même si les armatures dans les coffrages sont assez serrées.

Par ailleurs, ces bétons devraient permettre de produire de très bons parements.

L'essai au cône n'a plus de sens pour ces bétons, parce que ces derniers s'effondrent complètement après le soulèvement du cône. Certains problèmes rhéologiques liés à ce type de bétons restent encore à solutionner.

VERNET et CADORET [40] ont présenté récemment les résultats d'une étude sur l'évolution chimique du ciment. Dès les premières minutes après le contact entre le ciment et l'eau, il se forme deux hydrates à germination rapide : l'un est le silicate de calcium hydraté (CSH), formé par combinaison des ions Ca^{2+} , SiO_4^{2-} et OH^- provenant des silicates de calcium du clinker; l'autre est l'étrangéité, trisulfoaluminate de calcium hydraté formé par combinaison des ions Ca^{2+} , SiO_4^{2-} , AlO_2^- et OH^- , provenant des aluminates du clinker et des régulateurs de prise (gypse, semi-hydrate, anhydrite).

Suit alors une période dormante qui varie de quelques dizaines à une centaine de minutes, pendant laquelle la formation de CSH et d'étrangéité se poursuivent lentement, et la phase aqueuse devient sursaturée en chaux.

Puis, c'est la période de prise. Celle-ci intervient dès que le niveau de concentration en silicates de la phase aqueuse est descendu au-dessous d'un seuil voisin de quelques micromoles par litre.

La consommation rapide d'ions Ca^{2+} et OH^- par la formation de Ca(OH)_2 accélère la dissolution de tous les constituants du clinker. L'hydratation reprend rapidement. La prise peut durer quelques heures.

Vient ensuite la période de durcissement pendant laquelle le matériau obtient sa résistance. L'hydratation progresse très vite pendant les premiers jours et devient lente après quelques mois cependant, elle peut continuer plus de cent ans.

D'un point de vue rhéologique restreint, nous ne nous intéressons qu'aux propriétés des bétons avant leurs prises.

La complexité du béton rend difficile l'étude rhéologique de ce matériau. Une simplification, considérant le béton frais comme un matériau à deux phases (la pâte de ciment et l'ensemble des granulaires) a été proposée par certains auteurs [41,42].

Néanmoins, l'interaction entre ces deux phases ne consiste pas en une simple lubrification entre pâte et granulats, mais est une combinaison compliquée de l'effet visqueux de la pâte et de la masse des granulats [43,44]. Il est cependant utile de comprendre la rhéologie de la pâte de ciment, laquelle présente par ailleurs beaucoup de points communs avec celle du béton.

IV.2 Rhéologique De Béton

Le béton est un matériau multiphasique considéré comme un fluide non-newtonien. C'est une suspension concentré qui a un seuil de cisaillement dû au frottement entre les granulats et les particules du ciment, pour lequel une contrainte minimale T_0 est nécessaire afin de provoquer leur écoulement. En dessous du seuil de cisaillement le béton se comporte comme un solide et au-dessus du seuil, il se comporte comme un fluide. Pour trouver une relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement et décrire le comportement du béton nous avons plusieurs modèles mathématiques. Parmi ces modèles les plus utilisés nous avons : Bingham [45], Casson et Herschel–Bulkley [46].

➤ Bingham
$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad \text{et} \quad \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \mu \quad [|\tau| > \tau_0]$$

Où T est la contrainte de cisaillement (Pa), T_0 est le seuil de cisaillement (Pa), η est-la viscosité apparente (Pa.s), μ est la viscosité plastique (Pa^{-s}) et $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement (s^{-1}).

➤ Casson
$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu \dot{\gamma}} \quad \text{et} \quad \sqrt{\eta} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}} + \sqrt{\mu} \quad [|\tau| > \tau_0]$$

Où T est la contrainte de cisaillement (Pa), T_0 est le seuil de cisaillement (Pa), η est-la viscosité apparente (Pa.s), μ est la viscosité plastique (Pa.s) et $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement (s^{-1}).

➤ Herschel Bulkley
$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad \text{et} \quad \eta = K [\dot{\gamma}]^{n-1} + \tau_0 [\dot{\gamma}]^{-1} \quad [|\tau| > \tau_0]$$

Où T est la contrainte de cisaillement (Pa), T_0 est le seuil de cisaillement (Pa), η est-la viscosité apparente (Pa.s), $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement (s^{-1}), K est l'indice de consistance et n est l'indice de puissance

Pour les bétons traditionnels nous utilisons souvent la loi de Bingham qui décrit une variation linéaire de la courbe d'écoulement, qui est à la fois un modèle de type Herschel-Buckley avec $n=1$ [47].

Alors que le modèle de Bingham présente une relation linéaire parfaite entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation.

Le modèle de Casson utilise les mêmes paramètres que le modèle de Bingham mais s'exprime avec un comportement non linéaire. Le modèle Herschel Bulkley est appliqué sur des fluides avec un

comportement non linéaire et il peut être utilisé pour décrire une variation linéaire de la courbe d'écoulement avec $n = 1$. C'est une méthode pratique pour le béton traditionnel.

Il est considéré comme un modèle précis puisque son équation à trois paramètres ajustables [48]. Selon Larrard [49], le comportement du béton frais est mieux décrite par le modèle de Herschel-Bulkley et ce modèle évite le problème de la contrainte négative rencontrée avec le modèle de Bingham (Tableau IV.1). Les contraintes négatives sont liées à l'identification erronée des paramètres par lissage mathématique.

Cela veut dire qu'il est difficile d'obtenir des paramètres intrinsèques et qu'il est nécessaire de faire attention lors des mesures mais aussi lors de l'interprétation.

C'est pour cette raison qu'il faudrait par la suite identifier et fixer un seuil physique pour avoir une cohérence.

Tableau IV.1 : Paramètres du béton frais selon le modèle de Bingham et le modèle de Herschel Bulkley (μ^* Viscosité plastique équivalent) [49]

Matériaux	Mélanges	modèle Bingham		modèle Herschel B.			
		τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	τ_0 (Pa)	K	n	μ^* (Pa.s)
Béton à résistance normale	BO1C	1717	174	1804	111	1.23	156
	BO1B'	1489	163	1599	86	1.33	140
	BO1A	1219	160	1341	74	1.40	134
	BO1A'	881	133	983	62	1.40	111
Bétons à haute performance	BHP1A'	593	517	774	38.5	1.15	479
	BHP1B	473	530	608	430	1.10	501
	BHP1C	141	439	471	205	1.40	370
Bétons auto-compactants	BHP8C	-452	1960	675	792	1.88	2956
	BHP8B	-373	879	457	269	1.73	795
	BHP8A	-147	488	385	132	1.70	376

D'après la (Figure IV.1), on observe la variation des courbes selon le modèle utilisé. Pour le modèle Bingham et Casson, en utilisant les mêmes paramètres, nous trouvons différents comportements avec un rapport de viscosité apparent plus grand pour le modèle Casson. Concernant la variation de la viscosité, la viscosité diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. La viscosité apparente η est approximativement $T/\dot{\gamma}$ qui tend vers l'infini quand $\dot{\gamma}$ tend à zéro, et tend vers 0.5 quand $\dot{\gamma}$ tend à l'infini. Pour le modèle Herschel Bulkley, la viscosité dépend beaucoup des trois paramètres ajustables utilisés

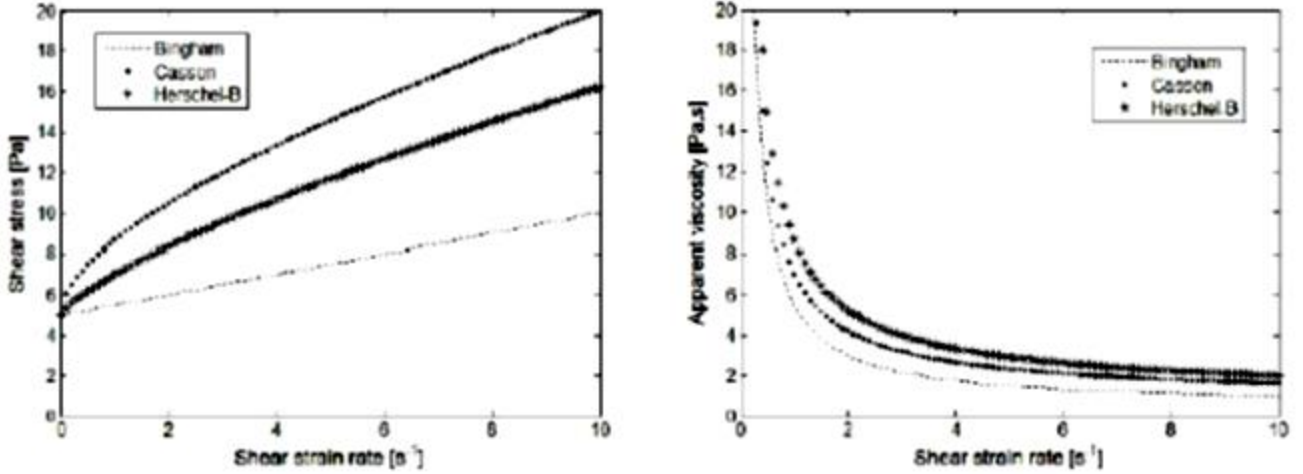


Figure IV.1 : a) Contrainte de cisaillement et b) Viscosité apparente vs taux de cisaillement pour différents modèles classiques avec différents paramètres : $T_0 = 5$, $\mu = 0.5$, $n = 0.75$ et $K=2$

IV.2.1 Approche Modifiée Par Papanastasiou

Tous les modèles classiques décrits peuvent décrire les écoulements simples à partir d'un seuil de cisaillement. Pour les champs de flux généraux, il est nécessaire de développer des techniques numériques pour pouvoir décrire le passage entre la zone avec seuil et celle sans seuil. Ceci peut être possible en introduisant dans les modèles un paramètre de continuité qui facilite le processus de résolution et produit pratiquement les mêmes résultats que les modèles classiques. Ceci dépend du bon choix des paramètres. Ainsi Papanastasiou [50] propose une régularisation exponentielle de l'équation de Bingham idéal, en introduisant un paramètre m , qui contrôle la croissance exponentielle de la contrainte. Ainsi la modification de Papanastasiou peut s'appliquer aux différents modèles qui deviennent un flux de cisaillement en 1D [51]

➤ Bingham-Papanastasiou

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

➤ Casson-Papanastasiou

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

➤ Herschel-Bulkley Papanastasiou

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

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

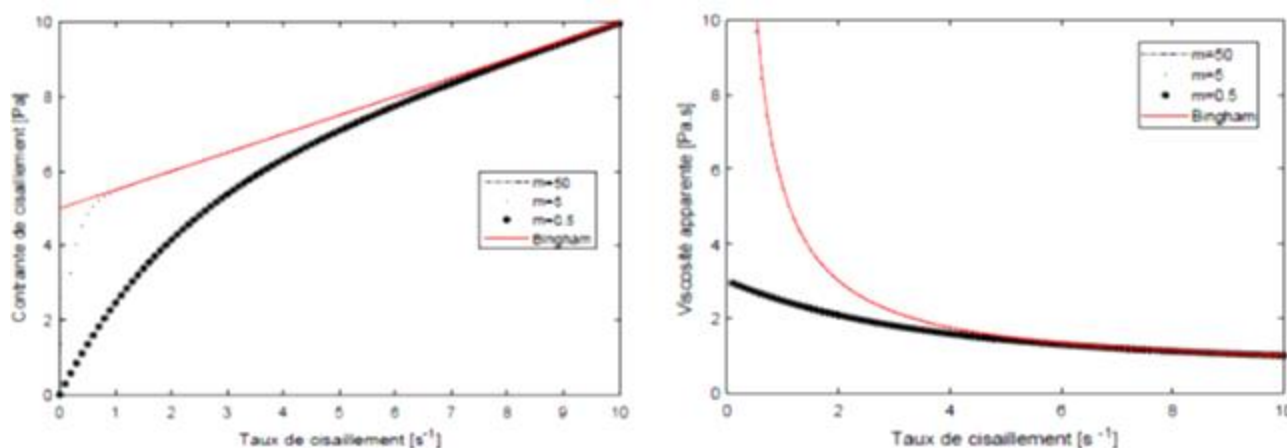


Figure IV.2 : Modèle de Bingham-Papanastasiou pour différentes valeurs de m , avec :

$$T_0 = 5 \text{ et } \mu = 0.5$$

Comme nous le montrons dans la (Figure IV.2) pour le modèle Bingham Papanastasiou, à faible taux de cisaillement la contrainte évolue rapidement mais au-delà de la limite d'élasticité (seuil) la contrainte évolue lentement et linéairement avec une viscosité constante.

Si m tend vers l'infini l'écoulement devient un fluide de type Bingham idéal tandis que si $m = 0$, le fluide devient un fluide newtonien.

Pour le modèle Casson Papanastasiou (Figure IV.3), si m tend vers l'infini l'écoulement devient un fluide de type Casson idéal tandis que si $m = 0$, le fluide devient un fluide sans seuil. Pour le modèle de Herschel Bulkley Papanastasiou (Figure IV.4), si m tend vers l'infini l'écoulement devient un fluide de type Herschel idéal tandis que si $m = 0$, le fluide devient un fluide sans seuil.

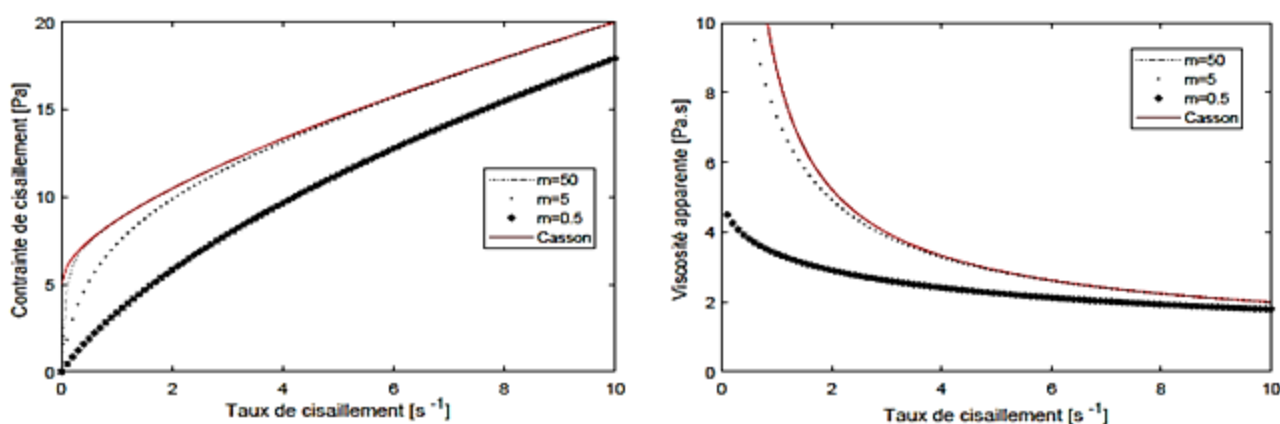


Figure IV.3 : Modèle de Casson-Papanastasiou pour différentes valeurs de m avec :

$$T_0 = 5 \text{ et } \mu = 0.5$$

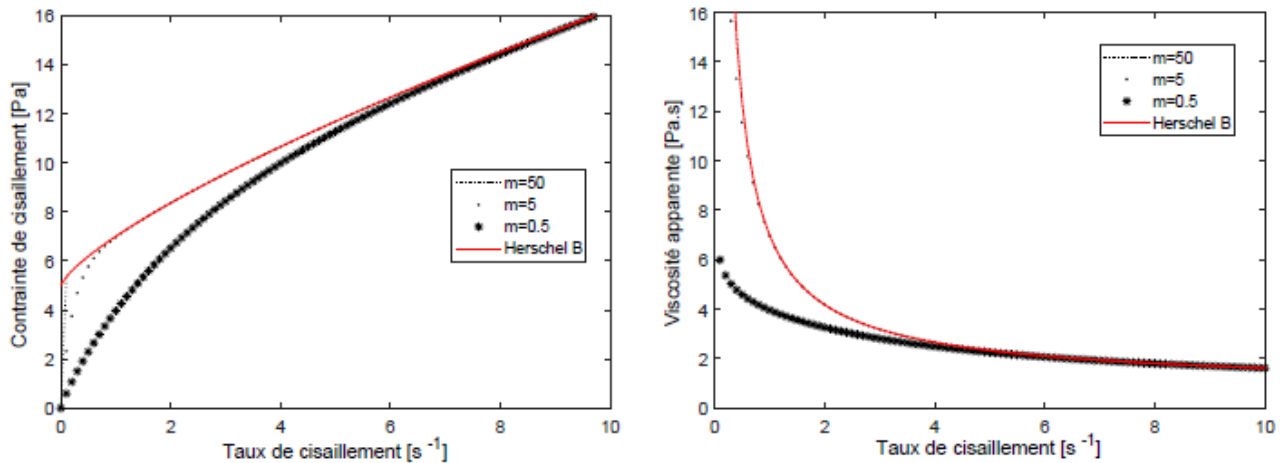


Figure IV.4 : Modèle de Herschel Bulkley-Papanastasiou pour différentes valeurs de m avec : $T_0 = 5$ et $n = 0.75$ et $K=2$

IV.2.2 Paramètres Influant Sur La Rhéologie Du Béton Frais

IV.2.2.1 Compositions Du Béton

De nombreux travaux ont été réalisés sur l'effet de la composition du béton sur son seuil de cisaillement et sa viscosité. Lesquels ont permis de créer des rhéographes.

Un rhéographe est le résultat d'une recherche pour examiner l'effet de différents changements sur la rhéologie du béton dû à l'eau ajoutée, à l'air entraîné, aux superplastifiants (SP) et aux fumées de silice (SF) utilisés dans un mélange du béton, ainsi que l'influence de la forme et quantité des granulats [47] (Figure IV.5).

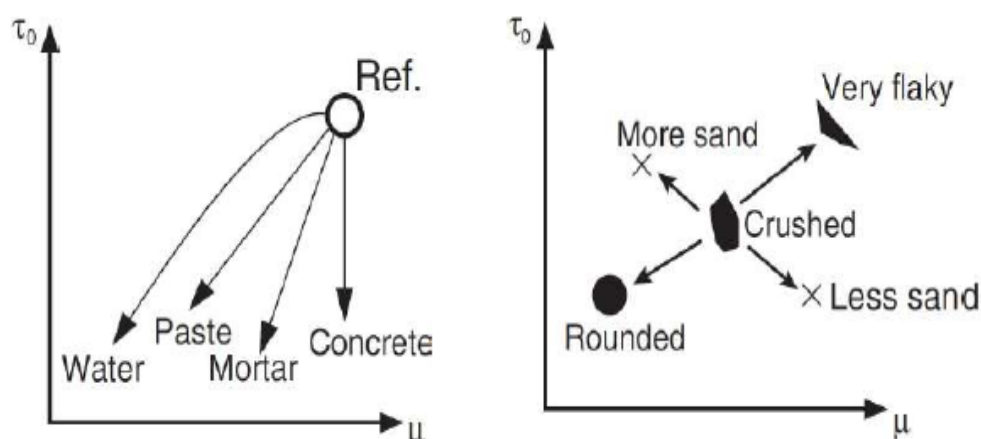


Figure IV.5 : Présentation des rheographes seuil de cisaillement vs viscosité des pâtes de ciment, mortiers et bétons : avec l'ajout de SP (gauche) et effet de la forme des granulats et la quantité de sable (droite) [47].

❖ Rapport E/C

Dans la plupart des études, le rapport E/C a une influence sur les propriétés rhéologiques des bétons.

D'après Banfill [47], lorsque le rapport E/C augmente, les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique du béton diminuent (Figure IV.6).

❖ Granulats

Le seuil de cisaillement est déterminé par le nombre et la nature des contacts entre les grains de la matrice cimentaire. La phase granulaire et ses interactions avec la pâte ont une influence sur l'écoulement des bétons.

La variation de la concentration de granulats entraîne deux phénomènes. A faible concentration des granulats dans la matrice, l'écoulement du béton est amélioré quand la densité des granulats est supérieure à la densité de la pâte de ciment et freinée si la densité des granulats est inférieure.

Si la concentration de granulats augmente, l'écoulement du béton est freiné. La diminution d'écoulement dépend de la forme de granulats.

Les granulats sphériques facilitent l'écoulement par rapport aux granulats concassés [47].

❖ Adjuvants

Les adjuvants jouent un rôle important sur la rhéologie des bétons, par exemple, l'agent entraîneur d'air diminue le seuil de cisaillement et la viscosité, ainsi les plastifiants et super plastifiants réduisent le seuil de cisaillement, mais dans le cas de la viscosité les avis sont variables [54].

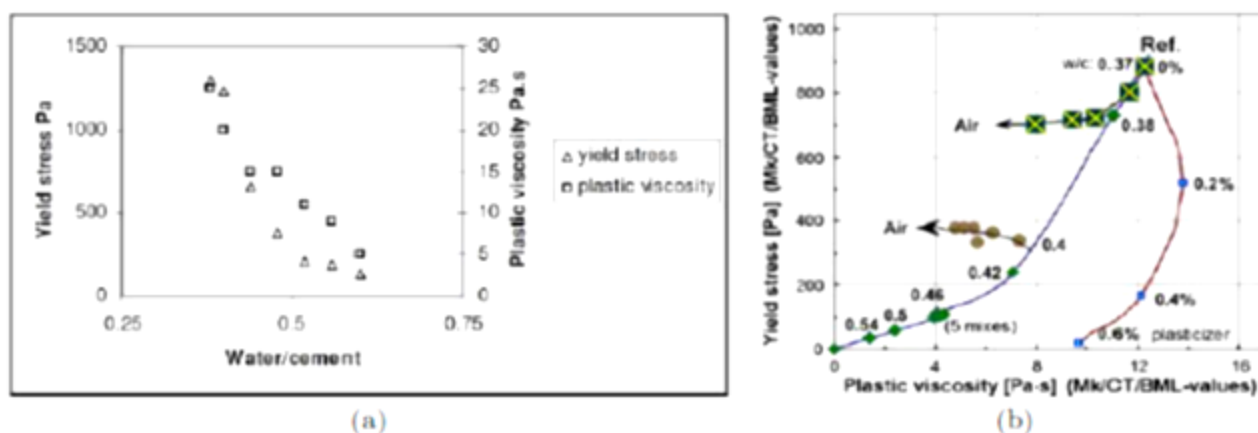


Figure IV.6 : a) Effet du rapport E/C sur le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons frais. b) Effet de l'eau, l'air et le plastifiant sur le seuil et la viscosité des mortiers [47].

❖ Type De Malaxage

Selon Wallevik [47], le type de malaxeur a une influence très importante sur le comportement rhéologique du béton.

Les échantillons testés ont été des Bétons Autoplaçant (BAP) mélangés avec trois malaxeurs de capacités différentes pour trois mélanges désignés comme MC05, MC06 et MC19.

Les malaxeurs sont le mélangeur à tambour (Drum mixer), le mélangeur Maschinenfabrik Gustav Erich de 50 litres et un mélangeur Maschinenfabrik Gustav Erich 150 litres. Selon la publication, environ 25 litres de béton sont mélangés dans le mélangeur à tambour, 40 litres dans le mélangeur Gustav Erich 50 et 100 litres dans le mélangeur Gustav Erich 150.

L'auteur précise que la vitesse de rotation appliquée pendant le mélange est plus importante pour le mélangeur de 150 l, par rapport au mélangeur de 50 l.

Les résultats sur l'influence de propriétés rhéologiques selon le type du malaxeur sont présentés dans la (Figure IV.7).

Selon la (Figure IV.7), le mélangeur Gustav Erich de 150 litres donne la viscosité plastique la plus faible de tous les mélanges c'est-à-dire que lorsque la taille du mélangeur augmente, la viscosité plastique diminue.

D'autre part, l'influence du mélange sur les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment a été étudiée par [55].

Les pâtes de ciment ont été cisailées à une vitesse constante dans un rhéomètre, et puis soumises à des vitesses de cisaillement croissantes

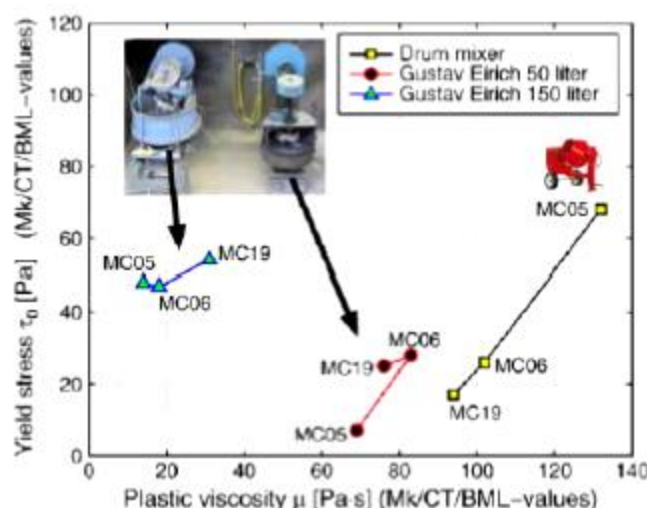


Figure IV.7 : Influence du type de malaxeur sur la rhéologie de béton [47]

Décroissantes Six méthodes sont utilisées pour mélanger les pâtes de ciment. Mélanges à la main pendant 15 secondes, un mélangeur planétaire Hobart, un mélangeur à cisaillement élevé Ross et une bétonnière à tambour basculant pour un béton. Les résultats de la variation de la viscosité selon la méthode sont affichés dans la (Figure IV.8)

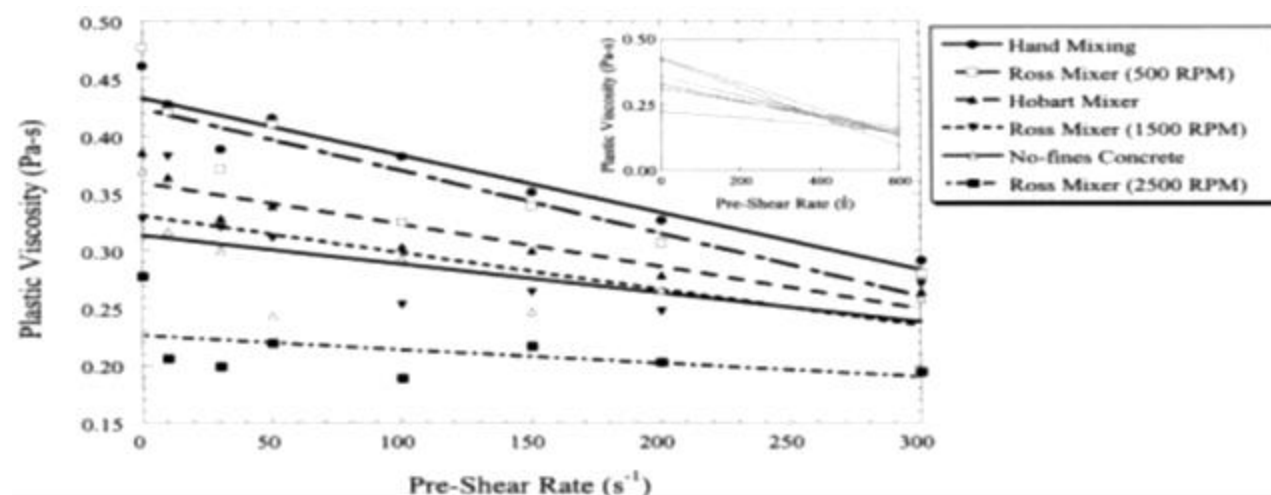


Figure IV.8 : Viscosité plastique en fonction du taux de pré-cisaillement pour différentes techniques de mélange [55].

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

Type de rhéomètre

De la même manière, en fonction du type de rhéomètre utilisé, ceux-ci généreront des valeurs différentes des propriétés rhéologiques du béton, telles que détaillées par Banfill (Figure IV.9).

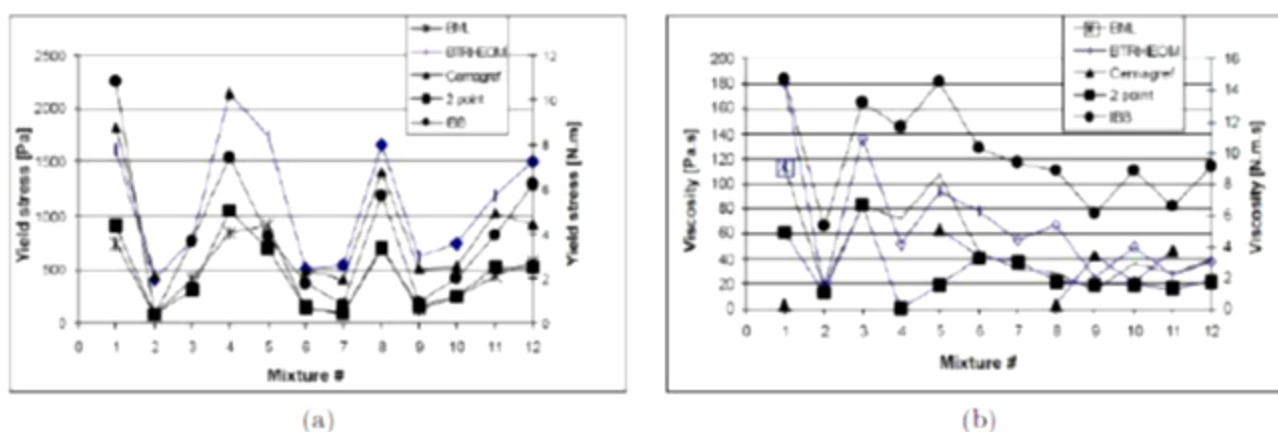


Figure IV.9 : Comparaison des seuils d'écoulement (a) et de la viscosité (b) mesurées avec différents type de rhéomètres [54]

IV.3 Différents Modèles Rhéologiques

Dans le béton, l'hydratation du ciment ne dépend pas uniquement des phases majeures (C3S, C2S, C3A, C4AF), mais aussi de l'effet des alcalis et des sulfates. Selon leur forme et leur concentration, ces sulfates et alcalis peuvent améliorer ou détériorer les propriétés des bétons frais et durcis. Les sulfates alcalins présents dans le clinker jouent le rôle de régulateur de prise.

L'influence des sulfates sur le comportement rhéologique de la pâte du ciment ne dépend pas uniquement des quantités présentes dans le clinker, mais de la forme des sulfates présents et surtout de la vitesse de passage des ions SO_4^{2-} et Ca^{2+} en solution dans l'eau de gâchage.

Aussi, la quantité d'alcalis provenant des formes des sulfates alcalins influe sur l'hydratation initiale du ciment. Leur effet diffère de celui des alcalis incorporés dans les phases silicates et aluminates du ciment.

La formulation des bétons modernes (BAP) exige des rapports E/C faibles, d'où la nécessité de l'utilisation de différents super plastifiants [47].

L'étude de l'interaction entre le ciment et super plastifiants s'avère indispensable afin d'élucider le problème d'incompatibilité ciment/superplastifiants, et par conséquent éviter les problèmes de la perte de fluidité des coulis.

L'adsorption de super plastifiant est aussi influencé par la concentration d'ions sulfates dans l'eau interstitielle.

IV.3.1 Rhéologie Des Bétons Modernes

Les principaux paramètres rhéologiques des suspensions sont la viscosité plastique, la vitesse de cisaillement, le seuil de cisaillement, la thixotropie, etc.

IV.3.1.1 Comportement Rhéologique Des Fluides

Le comportement le plus simple est le comportement Newtonien qui a une relation linéaire entre contrainte de cisaillement et taux de cisaillement.

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

La pâte de ciment, mortier et béton peuvent être décrits comme des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'au-dessous d'une valeur de la contrainte critique (c.-à-d. le seuil de cisaillement), la matière se comporte comme un solide mais s'écoule comme un liquide visqueux, quand cette contrainte est dépassé ($\tau > \tau_0$). Le type le plus simple de ce comportement est le comportement linéaire du fluide de Bingham (Figure IV.10 et Tableau IV.2) :

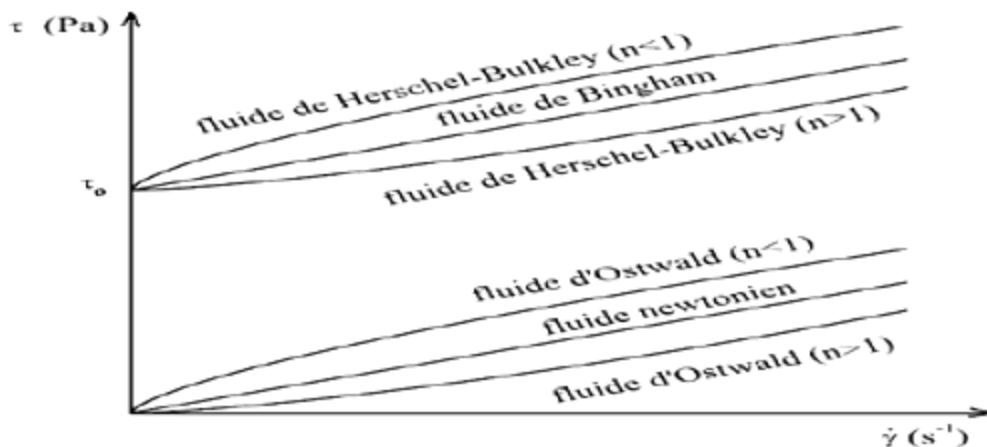


Figure IV.10 : différents Comportements d'écoulement

Tableau IV.2 : Modèles rhéologiques

<i>Différents modèles rhéologiques</i>	Equation caractéristique
Modèle de Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$
Modèle d'Eyring	$\tau = a \sinh^{-1}(b\dot{\gamma})$
Modèle de Casson	$\tau = \tau_0 + \eta_\infty + 2(\tau_0 \eta_\infty)^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2}$
Modèle de Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad n < 1$
Modèle de Von-Berg	$\tau = \tau_0 + b \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/c)$
Modèle de Sisko	$\tau = a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^c \quad c < 1$
Modèle de Robertson-Stiff	$\tau = A(\dot{\gamma} + B)^c$
Modèle d'Atzeni et al	$\tau = \tau_0 + \eta_\infty \dot{\gamma} + b \sinh^{-1}(\dot{\gamma}/c)$

IV.3.1.2 Interaction C3A-Plastifiant

L'étude de l'interaction entre le C3A et un PNS a trouvé que la quantité de PNS consommé par le C3A dépasse la quantité adsorbable. Par ailleurs l'hydrate formé semble stable. [57]

Les plastifiants ont aussi un effet sur la dissolution des sulfates et sur la nucléation des cristaux d'étrangéité.

IV.3.1.3 Les Sulfates Alcalins

L'effet des sulfates alcalins sur la rhéologie des pâtes de ciment est un facteur non négligeable. Ces sulfates alcalins sont principalement: arcanite (K_2SO_4), langbeinite ($2CaSO_4, K_2SO_4$), aphthalite ($Na_2SO_4, 3K_2SO_4$).

Il existe une compétition entre les alcalis et les sulfates lors de l'hydratation des ciments. On devait donc tenir compte de la teneur en SO_3 des sulfates alcalins des ciments avant d'ajouter du gypse au clinker, à 3% environ.

Cette méthode est valable pour les ciments destinés pour les bétons ayant un rapport E/C élevé, mais pour les bétons à haute performance, avec des rapports E/C faibles, il est impératif de tenir compte des sulfates alcalins et des ions SO_4^{2-} qu'ils apportent. Les sulfates et les alcalis sont reliés par le degré de sulfuration :

$$DS = \frac{SO_4^{2-}}{1.292 Na_2O + 0.85 K_2O}$$

Les comportements rhéologiques des pâtes (ou des bétons) sont influencés par les alcalins et par les sulfates.

Tous les sulfates alcalins ont une solubilité élevée. Par rapport à l'hémihydrate ($CaSO_4, 1/2H_2O$) la langbeinite ($2CaSO_4, K_2SO_4$) contribue à un meilleur comportement rhéologique.

IV.3.1.4 Rôle Des Superplastifiants

Les superplastifiants améliorent la fluidité des bétons modernes en réduisant le rapport E/C. L'étude du mécanisme d'action de ces substances montre qu'il existe une interaction avec les phases du clinker lors des processus physico-chimiques de l'hydratation du ciment. [46].

IV.4 Modelé De Bingham

Le béton frais est un matériau multiphasique considéré comme le mélange d'un fluide Non-Newtonien (pâte du ciment + des granulats) avec de l'air. Le fluide non-Newtonien est caractérisé par une contrainte de cisaillement τ_0 . Quand les contraintes appliquées au fluide Non-Newtonien ne dépassent pas la contrainte τ_0 , le fluide se comporte comme un matériau rigide indéformable. Autrement, le fluide s'écoule. La rhéologie du béton dépend de sa formulation (nature et granulométrie de granulats, rapport E/C ou l'effet de différentes additions des constituants du béton).

Pour décrire le comportement du béton, plusieurs modèles semi-empiriques ont été développés pour trouver une relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de déformation. Le modèle le plus répandu est celui de Bingham [45] :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Avec : $\tau > \tau_0$ (Pa) : Contrainte de cisaillement, τ_0 (Pa) : Seuil de cisaillement, μ (Pa.s) : Viscosité constante et $\dot{\gamma}$: Taux de déformation

Papanastasiou [50], a proposé un modèle basé sur la fonction exponentielle afin de régulariser le modèle de Bingham en introduisant un paramètre de contrôle m . Ce modèle est appelé généralement le modèle de Bingham-Papanastasiou [48], il s'exprime comme suit :

$$\tau = \tau_0 [1 - \exp(-m\dot{\gamma})] + \dot{\gamma}\mu$$

Avec m : Paramètre de régularisation/contrôle (si $m=0$ fluide newtonien, si $m \rightarrow \infty$, fluide Bingham idéal) Voir (Figure IV.11) La relation entre la viscosité apparente η (Pa.s) et le taux de déformation peut être déduite :

$$\eta = \mu + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} [1 - \exp(-m\dot{\gamma})]$$

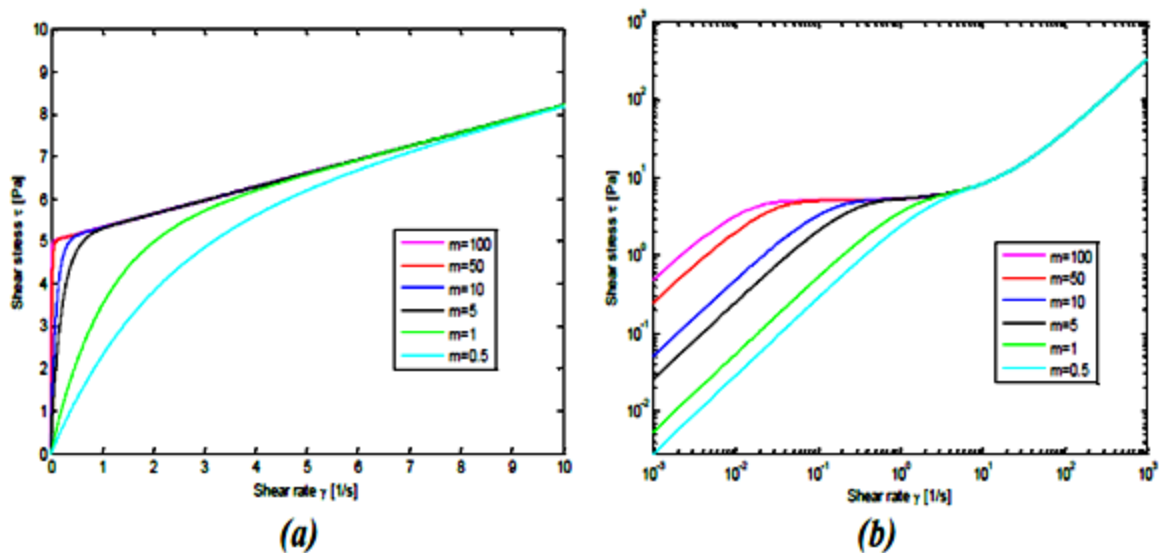


Figure IV.11 : Comportement d'un fluide non newtonien avec seuil selon la loi de Bingham Papanastasiou selon différentes valeurs de m : (a) linéaire et (b) logarithmique

IV.5 Quelques Résultats D'essais Rhéologiques Des Diffèrent Type De Béton [46]

Afin d'optimiser les meilleures paramètres rhéologiques des pâtes cimentaires élaborées tels que la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique (t , η_p) avec un bon comportement à l'écoulement du BAP.

Les résultats obtenus montrent l'évolution de la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique en fonction de la vitesse de cisaillement.

Les résultats montrent une diminution considérable de la contrainte de cisaillement et la viscosité plastiques pour tous les mélanges des pâtes de ciment à différents dosages du superplastifiant.

En effet, à 1.5% d'adjuvant de superplastifiant, une réduction d'environ de 30 % à 70% de la contrainte de cisaillement pour les pâtes de ciment à base de pouzzolane et de tuf (Figure IV.12 et Figure IV.14).

Cependant, pour celles des pâtes à base de laitier, une léger diminution de la contrainte de cisaillement a été enregistrée (Figure IV.13).

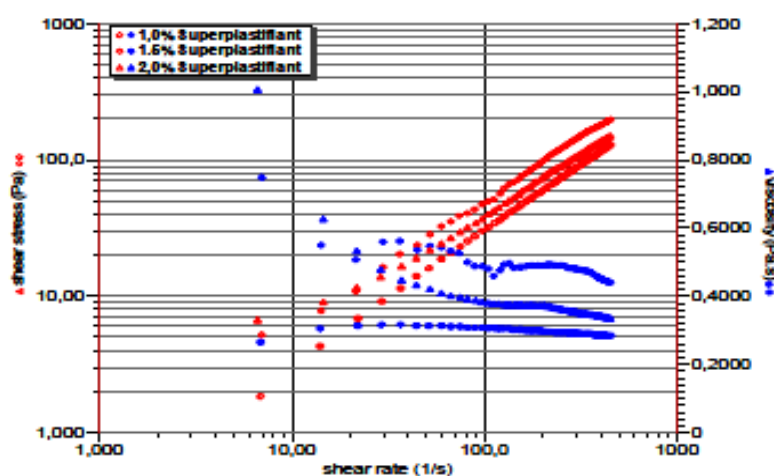


Figure IV.12 : Rhéogrammes des pâtes cimentaires à base de fines de pouzzolane à différents dosages de superplastifiants

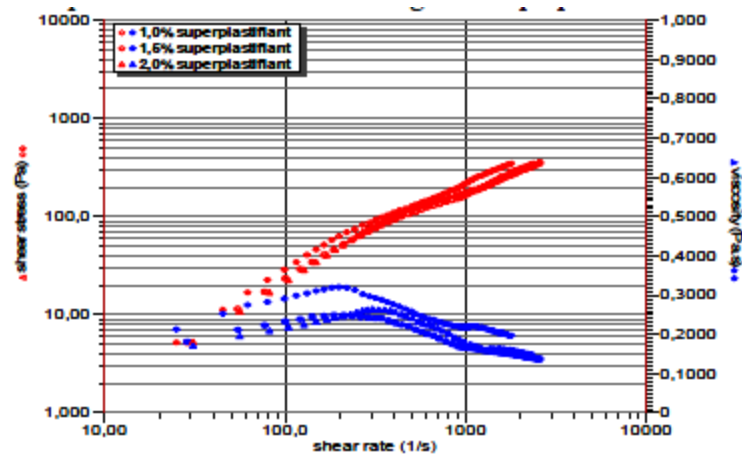


Figure IV.13 : Rhéogrammes des pâtes cimentaires à base de fines de laitier à différents dosages de superplastifiants

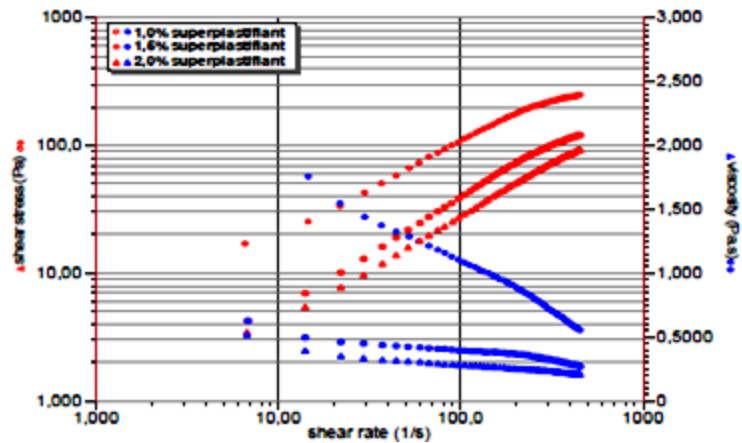


Figure IV.14 : Rhéogrammes des pâtes cimentaires à base de fines de tuf à différents dosages de superplastifiants

Il apparaît, d'après ces courbes, que le superplastifiant a joué son rôle de fluidifiant pour améliorer les principales propriétés rhéologiques.

Concernant la viscosité plastique des mélanges, il est clair et d'après les rhéogrammes obtenus que plus le dosage de superplastifiant augmente, plus la viscosité devient stable et plus la fluidité de la pâte augmente [47].

Ça signifie que les pâtes deviennent un fluide Newtonien avec des dosages plus élevés d'adjuvants.

On constate également que la viscosité a chuté d'une manière remarquable pour les pâtes à base de pouzzolane et de tuf. Au-delà d'un dosage de SP, la fluidité est constante, ce dosage est celui de point de saturation [49- 50].

Il est à noter que, la présence de la fraction fine ainsi que la nature de ces ajouts (porosité et absorption d'eau) influencent considérablement les propriétés rhéologiques.

Il est à signaler que pour les pâtes à base de laitier, on peut y aller jusqu'à 2% d'adjuvant sans effet important.

A la base de ces résultats, on préfère d'utiliser un dosage de superplastifiant de 1.5% comme une valeur optimale dans le cas de la formulation de composition des bétons autoplaçants pour les ajouts des fines minérales (la pouzzolane, le laitier et le tuf).

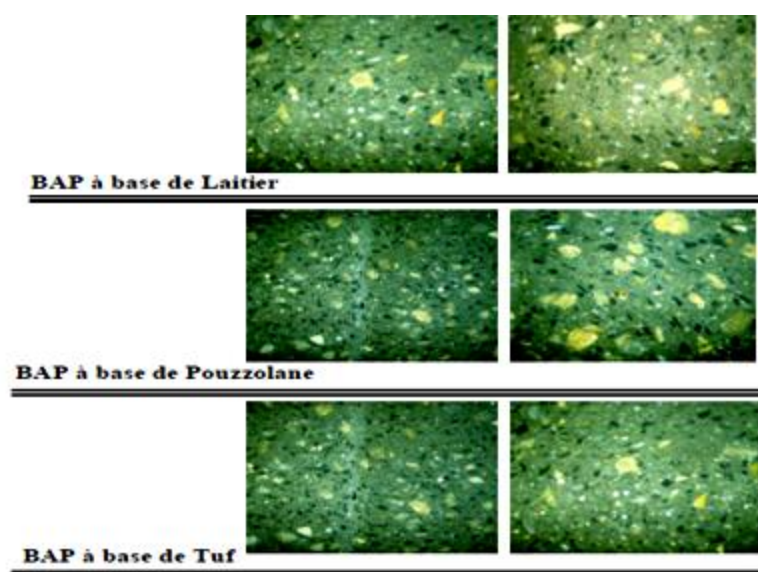


Figure IV.15 : Aspect macroscopique des BAP (répartition des granulats dans une pâte optimisée)

Des essais effectués sur béton frais en utilisant les méthodes de mesure comme la boîte en (L) l'étalement au cône et la stabilité au tamis montrent que les bétons obtenues sont des BAP à savoir que la valeur d'étalement est entre 60 et 80 cm et la mesure en boîte en (L) est supérieure à 0.8.

La valeur mesurée en stabilité au tamis est inférieure à 15%. On constate que les bétons autoplaçants formulés à base de la pâte optimisée, ont données des meilleures caractéristiques à l'état frais, à savoir une bonne fluidité. Il est à signaler également que l'étalement des BAP est variable.

La bonne fluidité obtenue est celle du béton à base laitier. Ceci est confirmé d'après les images macroscopiques (Figure IV.15).

Ces images montrent que la répartition des agrégats est bien homogène dans une partie de pâte adéquate

CONCLUSIONS GENERALES

L'intérêt croissant pour les nouveaux bétons en particulier les bétons fluides et leur utilisation dans beaucoup de domaines du génie civil, a fait que nous avons voulu apporter une contribution à l'étude théorique de ce type de béton, pour cela notre étude se porte sur la caractérisation du comportement rhéologique des bétons fluides.

A partir de la présente étude, et en se basant sur les résultats obtenus lors des travaux de recherche antérieures effectuées sur plusieurs types des bétons fluides, il ressort les points suivants :

- ✓ L'étude rhéologique permis d'identifier les différents facteurs qui ont une sur les paramètres rhéologiques (τ , η_p).
- ✓ L'optimisation des paramètres rhéologiques de la pâte constitue un facteur très important. En effet, ces études ont permis de conclure que la nature des ajouts cimentaires utilisés ont une influence considérable sur le choix des matériaux, la formulation des béton fluides et l'utilisation d'outil de contrôle des paramètres rhéologiques (τ , η_p) avant la formulation d'un béton fluide.
- ✓ L'influence des sulfates sur le comportement rhéologique de la pâte de ciment ne dépend pas uniquement des quantités présentes dans le clinker mais aussi des natures des sulfates.
- ✓ La présence d'une quantité élevée d'alcalis dans les sulfates alcalins a un effet négatif sur la fluidité. L'effet du sulfate de calcium est double. Il commence d'abord par diminuer la quantité d'alcalis en remplaçant ces derniers, mais aussi en apportant des ions Ca^{2+} dans la solution, ce qui permet de freiner l'hydratation des phases de ciment. L'ajout d'une importante quantité de gypse est donc nécessaire avec les clinkers riches en arcanite ou/et en aphotitalite.
- ✓ Une présence importante de sulfates alcalins ou d'hémihydrate dans le ciment peut provoquer la cristallisation de la syngénite ou du gypse qui pourra diminuer la fluidité.
- ✓ L'interaction entre $\text{C3A-SO}_3\text{-Na}_2\text{O}$ peut être exprimée par un facteur (DS/C3A , par exemple). Pour chaque forme de sulfate alcalin dans le clinker, ce facteur présente un optimum qui donne la meilleure maniabilité. Une recherche plus détaillée sur ce facteur devrait être effectuée en étudiant des clinkers industriels ayant des dosages différents en C3A, SO_3 , ainsi que la nature des sulfates alcalins ajoutés

- [1] Le béton projeté par voie humide [ACI, 1995].
- [2] [Resse ET Vénuat, 1981] les auteurs font le point sur les connaissances actuelles en projection, les différentes techniques, les applications, les recherches en cours, la réglementation (inv.15856-doc.bibl-inv. 15917- soa-m. godart-inv. 15937-mme. mg. nm. charonnat).
- [3] [Beaupré, 1994].
- [4] Guide d'utilisation du béton en site maritime Benoît THAUVIN & Michel MENGUY (centre d'étude techniques maritimes ET fluvial)
- [5] BENKECHKACHE Ghofrane «Etude de comportement diffère des bétons autoplaçant Influence de paramètres de composition et de chargement», thèse de magister novembre 2007 université mentouri Constantine.
- [6] François CUSSIGH « béton autoplaçant ». Technique de l'ingénieur.
- [7] SLIMANI Abderezzak « Science et technologie des bétons », mémoire d'ingénieure 2007
- [8] Fiche Techniques «Les bétons : formulation, fabrication ET mise en œuvre».
- [9] NF EN 197-1
- [10] NF EN 1008
- [11] XP P 18-540
- [12] Jolin et al. 2001 Best, J. A. , Thomson, S. J. , Santi, S. M. , Smith, E. A. , & Brown, K. S. (1988). Preventing cigarette smoking among schoolchildren. Annual Review of Public Health, 9, 161-201.
- [14] P. Oswald, Rhéophysique ou comment coule la matière. France : Belin, 2005.
- [15] P. Coussot, Rhéophysique - La matière dans tous ses états. France : EDP Sciences/CNRS Editions2012.
- [16] J. SCHER, "Rhéologie, texture ET texturation des produits alimentaires," Tech. ING. Agroaliment Vol. F2, no. F3300, p. F3300.1-F3300.13, 2006.

- [17] J.-L. Grossiord and A. Ponton, La mesure en Rhéologie - Des avancées récentes aux perspectives France : EDP Sciences, 2013.
- [18] A. Y. Malkin and A. I. Isayev, Rheology Concepts, Methods, & Applications. Canada: Publishing, 2006.
- [19] F. A. Morrison, Understanding Rheology. USA: Oxford University Press, 2001.
- [20] R. I. Tanner and K. Walters, Rheology: An Historical Perspective. UK : Elsevier Science, 1998.
- [21] A.-C. Roudot, Rhéologie ET analyse de texture des aliments. France: Tec & Doc Lavoisier, 2001.
- [22] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, an Introduction to Rheology. The Netherlands : Science, 1998.
- [23] L. Bilmes, "A Rheological Chart," Nature, vol. 150, p. 432, 1942.
- [24] LESAGE R., "Etude expérimentale de la mise en place du béton frais", Thèse de Paris VI et de Recherche LPC 37, Juin 1974, 127 p. MEHTA P.K., Concrète ; Structure. Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1986, 450 p.
- [25] BARON J., "La nécessité d'une démarche pragmatique : l'idée de maniabilité et sa mise en pratique", Le Béton Hydraulique, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 131-142.
- [26]: NEVILLE A.M., Properties of Concrete. Pittman Edition, London, 1982.
- [27]: DE LARRARD F., "La consistance du béton frais", Séminaire "Connaissances de base du béton", Paris, Novembre, 1989.
- [28]: B ARTOS P.J.M., "Assessment of properties of underwater concrete by the Orimet test", RILEM Workshop Special Concretes: Workability and Mixing, Paisley, March 1993, pp. 191-200.
- [29]: Sandrine BETHMONT « Mécanisme ségrégation dans les bétons autoplaçant », thèse de doctorat de l'Ecole National des Ponts ET Chaussées.

- [30] :Habib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçant », Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, le 06 Juillet 2006.
- [31] TATTERSALL G.H., "Progress in measurement of workability by the tow-point test". Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October 1990, pp. 203-212.
- [32]: DE LARRARD F., SZITKAR J.C., et HU C., "Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides", Bull. Liaison Labo P. et Ch., 186, Juillet-Août 1993.
- [33]: LEGRAND C., "Le comportement rhéologique des suspensions de ciment", Le Béton Hydraulique. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts ET Chaussées, 1982, pp. 115-130. [Nielsen, 2005]
- [34]: L'INSTITUT AMERICAIN DU BETON
- [35]: KIKUKAWA H., "Rheological studies on fresh concrete using admixtures" Proceedings of the international conference on "Admixtures for concrete: Improvement of properties", RILEM. Barcelona, May 1990, pp. 34-50.
- [36] WALLEVIK O.H. and GJØRV O.E., "Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh concrete", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October 1990, pp. 213-224.
- [37] STRUBLE L.J., "The rheology of fresh cement paste", International Symposium on "Advances in Cementations Materials", Conference of American Ceramic Society 1991, pp. 7-29.
- [38] GJØRV O.E., "High-Strength Concrete", Advances in Concrete Technology Malhotra V.M. Ed., Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, MSL G2-6 (RX May 1992.
- [39] TANGTERMSIRIKUL S., SAKAMOTO J., SHINDOH T. and MATSUOKA Y "Development of super workable concrete", 4th CANMET/ACI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary papers, Istanbul, May 1992.
- [40] VERNET C. et CADORET G. "Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours" Séminaire BHP, ENS Cachan, Juin, 1991.

- [41] BARRIOULET M. et LEGRAND C. "Les interactions mécaniques entre pâte et granulaires dans l'écoulement du béton frais", Proceedings of the international conférence on "Propriétés of Fresh Concrete", RILEM, London, Octobre, 1990, pp. 263-270.
- [42] HOBBS D.W., "Influence of aggregate volume concentration upon the workability of concrete and some predictions from the viscosity-elasticity analogy", Magazine of Concrete Research, Vol. 28, No. 97, December 1976, pp. 191-202.
- [43] BARRIOULET M. and LEGRAND C. "Diphasic semi-empiric model for the rheological behavior of vibrated fresh concrete", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March 1990, pp 343-351.
- [44] LEGRAND C., «Workability and rheology», RILEM Workshop Special Concretes: Workability and Mixing, Paisley, March 1993, pp. 51-54.
- [45] Bingham, 1922 GRIESSER A., 2002, "Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures; for the degree of Doctor of Technical Sciences" 2002; Swiss federal institute of technology
- [46] Herschel and Bulkley, 1926 Model for time dependent behavior of fluids
- WH Herschel, R Bulkley - Proc. American Society of Testing Materials, 1926
- [47] Haraldsson and Elvar, 2011 Battelino, T, Conget, I, Olsen, B. The use and efficacy of continuous glucose monitoring in type 1 diabetes treated with insulin pump therapy: a randomised controlled trial. Diabetologia
- [48] Pevere Guibaud, 2006 LOOTENS D., 2004, « Ciments et suspensions concentrées modèles, écoulement, encombrement et floculation » ; thèse de doctorat de l'Université Paris VI
- [49] Larrard et al. 1998 Ferraris, C.F., 'Measurement of Rheological Properties of High-Performance Concrete: State-of-the-Art Report', National Institute of Standards and Technology
- [50] Papanastasiou, 1987 Department of Chemical Engineering and Materials Science, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455 U.S.A.
- [51] Evan Mitsoulins Flows of viscoplastic materials: Models and computations, Rheology reviews 2007. British Society of Rheology

- [52] Hu and Wang, 2001 Aplin, H.M., Hirst, K.L. & Dixon, M.J. Refinement of the dentinogenesis imperfecta type II locus to an interval of less than 2 centiMorgans at chromosome 4q21 and the creation of a yeast artificial chromosome contig of the critical region. *J. Dent. Res.* **78**, 1270–1276
- [53] Banfill, 2006 Andersen MD, Jakobsen HJ, Skibsted J Characterization of white Portland cement hydration and the C-S-H structure in presence of sodium aluminate by ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR spectroscopy. *Cem Concr Res* 34:857–868
- [54] M. and C., 1977 Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics
- [55] David A. Williams, 1998 Serruys PW, Strauss BH, Beatt KJ, et al. Angiographic follow-up after placement of a self-expanding coronary-artery stent. *N Engl J Med* 1998
- [56] UchikawaH, Hanehara, S, Shirasaka.T, 1992, « .Effect of admixture on hydration of ciment, adsorptive behaviour of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste». *Cem Concr Res* 22 1992, 1115- 1129
- [57] Bouracan S., 1997 « Effet des sulfates alcalins sur les propriétés des ciments avec et sans super plastifiant » ; 1997 Université Sherbrooke (Québec) Canada.