

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie civil

Spécialité : matériaux

Par

- **Zerzi Imene**
- **Ounough Nesrine**

Intitulé

Etude par simulation numérique de l'effet des paramètres rhéologiques sur l'écoulement et la stabilité des BAP.

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M.Noui Ammar	MCA	Président	Univ-BBA
M.Belagraa Larbi	Pr	Encadreur	Univ-BBA
M. Kessal Oussama	MCA	Co-Encadreur	Univ-BBA
M.Benouadah Abdelatif	MCB	Examineur	Univ-BBA
M.Belkadi Abderraouf	MCA	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

La Première chose on remercie le Dieu pour le succès Qu'il nous a donné la volonté et la patience tout au long de la période d'étude.

*En second lieu nous remercions aussi notre encadreurs **Mr. KESSEL OUSSAMA**, et **Mr BELAGRAA LARBI** pour l'orientation, la confiance.et la patience tout long de ce travail. Nous tenons à remercier vivement toute personne qui a aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.*

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos parents et amis et collègues.

DEDICACE

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents. A Mon MARI, A mes frères et mes soeurs

A toutes ma famille. A mes amis

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un

jour avec un master en génie civil

Résumé

Les bétons autoplaçants se distinguent par une très grande fluidité, permettant leur mise en place sans vibration. Les additions minérales et les adjuvants sont deux composants indispensables pour la formulation des bétons autoplaçants ; ce sont les deux composants qui régissent le comportement rhéologique des bétons. Les additions minérales sont introduites dans les bétons pour améliorer leur comportement rhéologique à l'état frais, mais aussi pour participer aux propriétés mécaniques et de durabilité des bétons, notamment dans le cas où elles sont actives.

Dans notre étude, deux approches (expérimental et simulations) ont été utilisées afin d'étudier le comportement des bétons autoplaçants (BAP). Des essais de l'étalement, de la stabilité au tamis et de la boîte en L ont été effectués afin de qualifier le BAP. Le rhéomètre a été utilisé pour déterminer la viscosité et le seuil de cisaillement des BAP.

Pour la simulation le logiciel flow 3d a été utilisé pour simuler l'écoulement de béton avec différents paramètres rhéologiques.

Les résultats obtenus montrent une harmonisation entre les paramètres obtenus expérimentalement par simulation.

Mots clés : BAP, rhéologie, flow 3d, écoulement.

ABSTRACT

The self-lacing concretes are distinguished by a great fluidity, allowing them to be set up without vibration. Mineral additions and adjuvants are two essential components for the formulation of self-lacing concretes; they are the two components that govern the rheological behavior of concretes. Mineral additions are introduced into the concretes to improve their rheological behavior in the fresh state, but also to participate in the mechanical and durability properties of the concretes, especially when they are active.

In our study, two 'experimental' simulations were used on self-lacing concrete. In the first partial determination of rheological parameter was carried out using empirical methods based on workability tests such as spreading, sieve stability, L-box and rheometer to determine viscosity and shear threshold.

For simulation the 3d flow software was used to simulate concrete flow with different rheological parameter

The results obtained show a harmonization between the parameters obtained experimentally by simulation.

Keywords : BAP, rheology, flow 3d, flow.

ملخص

تتميز الخرسانة ذاتية الدمك بسيولة كبيرة، مما يسمح بإعدادها دون اهتزاز. الإضافات المعدنية والمواد المساعدة عنصران أساسيان لصياغة هذا النوع من الخرسانة ؛ وهما المكونان اللذان يحكمان السلوك الريولوجي للمكونات. يتم إدخال الإضافات المعدنية في الملخصات لتحسين سلوكها الريولوجي في الحالة الجديدة، ولكن أيضًا للمشاركة في الخصائص الميكانيكية والمتانة للملخصات، خاصة عندما تكون نشطة.

في دراستنا، تم استخدام عمليتي محاكاة والتجريبية على الخرسانة ذاتية الدمك. في أول تحديد جزئي السلوك الريولوجي. تم تنفيذه باستخدام طرق تجريبية تستند إلى اختبارات قابلية العمل مثل الانتشار وثبات الغربال وصندوق L ومقياس الرومتر لتحديد اللزوجة وعتبة القص.

لمحاكاة، تم استخدام برنامج التدفق ثلاثي الأبعاد لمحاكاة تدفق الخرسانة بمعلمة ريولوجية مختلفة تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تنسيقًا بين المعلمات التي تم الحصول عليها تجريبيًا عن طريق المحاكاة.

الكلمات الرئيسية : الخرسانة , الريولوجيا , التدفق ثلاثي الأبعاد , التدفق

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. Introduction :	3
2. Béton autoplaçant (BAP).....	3
2.1 Introduction (historique)	3
2.2 Définition des bétons autoplaçants :	4
2.3 Domaine d'utilisation des BAP	4
2.4 Caractérisation du BAP.....	5
2.5 Propriétés d'un BAP à l'état frais	5
2.6 Caractérisation des BAP	6
2.6.1 Essai d'étalement :	6
2.6.2 Essai de la boîte en L (L-box test) :	8
2.6.3 Essai à la boîte en U (U-Box).....	8
2.6.4 Essai de stabilité au tamis :.....	9
2.6.5 Essai d'entonnoir (V-Funnel NF EN 12350-9).....	9
2.6.6 Essai à la colonne :.....	10
2.7 Propriétés d'un BAP à l'état durci (destructif et non destructif).....	11
3. LA RHEOLOGIE	11
3.1 Paramètre rhéologie.....	12
3.1.1 Viscosité.....	12
3.1.2 Contrainte de cisaillement	14
3.1.3 Le taux de cisaillement.....	14
3.1.4 Seuil de cisaillement	14
3.1.5 Thixotropie	15
3.2 RHEOLOGIE DIFFERENTDES MATERIAUX CIMENTAIRES.....	16
3.2.1 Rhéologie de la pâte de ciment	16
3.2.2 Rhéologie du mortier de ciment.....	17
3.2.3 Rhéologie du béton	17
3.3 Les modèles rhéologiques	18
3.3.1 Le modèle de Bingham :	19
3.3.2 Le modèle d'Hershel-Buckley :	19
3.4 MESURE DE LA RHEOLOGIE DU BETON	20
3.5 RHEOLOGIE DES FLUIDES ET DES SUSPENSIONS :	20
3.6 Rhéologie du béton autoplaçant (BAP)	21
4. Simulations numériques d'écoulement du béton frais	24

CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET METHODOLOGIE D'ESSAI

1. INTRODUCTION	26
2. Simulation flow 3D :	26
3. Présentation de logiciel :	27
4. Caractérisation et méthodologie d'essais :	28
5. MATERIAUX DE BASE UTILISES :	28
5.1 Ciment :	28
5.2 L'eau de gâchage :	30
5.3 Adjuvant (super-plastifiant) :	30
5.4 LES GRANULATS :	30
5.4.1 Gravier :	30
5.4.2 Sable :	32
2.5.5 Additions minérales :	36
6. Formulation de béton :	37
6.1 Formulation du béton autoplaçant (BAP1) avec la super plastifiant:	37
6.1.1 Détermination de la masse de chaque constituant :	38
6.1.2 Confection du mélange :	39
6.1.3 Malaxage :	39
7. Essais de caractérisation des mélanges:	40
7.1 A l'état frais:	40
7.2 Rhéomètre.....	41
7.3 Mode opératoire :	42

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.

1. Introduction.....	44
2. L'influence de temps de coulage sur l'étalement de BAP.....	44
2.1 L'influence de temps de coulage sur la Seuil de cisaillement τ_0 de BAP ;	45
2.2 L'influence de temps de coulage sur la viscosité de BAP ;	45
2.3 Corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité.....	46
2.4 L'influence de temps de coulage sur la viscosité de BAP :	46
2.5 L'influence de temps de coulage sur la L1/L2 boîte en L de BAP :	47
3. Modélisation par FLOW 3d.....	48
3.1 Les étapes de la modélisation :	48
4. Les résultats de modélisation :	51
4.1 avant l'ouverture de la trape.....	51
4.2 après 1 seconde de l'ouverture de la trape	51
4.3 après 4 seconde de l'ouverture de la trape	52
5. Relation entre les résultats expérimentale et de la modélisation :	52

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau I.1 : détermination et poids de cône.....	07
Tableau I.2 : quatre types de viscosité.....	13

Chapitre 2 :

Tableau II.1 : Les caractéristiques techniques de ciment.....	29
Tableau II.2 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	31
Tableau II.3 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.....	32
Tableau II.4 : Séries des tamis utilisés pour le tamisage du sable.....	34
Tableau II.5 : Module de finesse du sable.....	34
Tableau II.6 : Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable.....	35
Tableau II.7 : caractéristiques physiques des granulats.....	36
Tableau II.8 : Dosage de super plastifiant.....	38
Tableau II.9 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC.....	39

Liste des Figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	06
Figure 1.2 : Essai J. Ring.....	07
Figure 1.3 : Essai de la boîte en L (L-box test).....	08
Figure 1.4 : Essai de la boîte en U (U-box).....	09
Figure 1.5 : Essai de stabilité au tamis.....	09
Figure 1.6 : L'essai V-funne	10
Figure 1.7 : Schéma glissement des couches	13
Figure 1.8 : Ecoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan.....	14
Figure 1.9 : Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du Béton	15
Figure 1.10 : Comportement d'un corps thixotropique	15

Figure 1.11 : différents composants du mélange sur la rhéologie du béton frais	18
Figure 1.12 : modèle de Bingham.....	19

Chapitre 2:

Figure 2.1 : FLOW 3D.....	28
Figure 2.2 : CEM II/B (CPJ 42.5).....	29
Figure 2.3 : Le super plastifiant MEDAFLOW 30.....	30
Figure 2.4 : Courbe granulométrique du gravier.....	31
Figure 2.5 : sable.....	33
Figure 2.6 : Courbe granulométrique du sable.....	33
Figure 2.7 : Essai d'équivalent de sable.....	34
Figure 2.8 : le calcaire	36
Figure 2.9 : Malaxeur à béton.....	40
Figure 2.10 : L'ensemble des essais effectués sur le béton frais (essai de l'étalement, stabilité au tamis, boîte en L, rhéomètre.....)	41

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : essai de cône d'Abrams pour le béton autoplaçant	44
Figure 3.2 : présente le développement de Seuil de cisaillement avec le temps.....	45
Figure 3.3 : présente l'évolution de viscosité en fonction de temps	45
Figure 3.4 : (explication) present la correlation entre la viscosite et le seil se cisaillemen.....	46
Figure 3.5 : présente l'évolution de L1/L2 en fonction de temps.....	47
Figure 3.6 : présente création de modèle par flow 3d en Etapes	47
Figure 3.7 : présente création de modèle par flow 3d en Etapes.....	48
Figure 3.8 : présente création de modèle par flow 3d en Etape.....	48
Figure 3.9 : choix des conditions aux limites	49
Figure 3.10 : Trasage de boîte en L	49
Figure 3.11 : transformatio ajouter maillage en etepes n	50
Figure 3.12 : ajouter maillage	50
Figure 3.13 : avant l'ouverture de la trape	51
Figure 3.14 : apres 1 seconde de l'ouverture de la trape	51
Figure 3.15 : apres 4 seconde de l'ouverture de la trape.....	52

➤ NOTATIONS

- Notations grecques dimensionnelles

μ Viscosité dynamique newtonienne, **Pa. s**

$\mu_a = \tau \dot{\gamma}$, Viscosité apparente, **Pa. s**

μ_p Viscosité plastique, **Pa. s**

$\dot{\gamma}$ Vitesse (taux) de cisaillement, **s⁻¹**

τ Contrainte de cisaillement, **Pa**

τ_c Contrainte critique lorsque la vitesse de cisaillement tend vers 0, **Pa**

ω vitesse de rotation (angulaire), **s⁻¹** ou **rad/s**

- Notations latines dimensionnelles

R_p Rayon de plan,

mR_c Rayon de cône,

mh L'entrefer entre deux plans, **m**

S La **s_k** Consistance d'un fluide d'OSTWALD,,**sⁿ**
surface,**2**

F La force, **N**

T Température, °C

t Temps, **s**

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est devenu un matériau omniprésent, tant dans le monde de la construction que dans d'autres domaines tels que l'art. A la fois économique et facilement manipulable, le béton répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité et sa résistance font de lui un matériau incontournable dans le domaine de la construction. Sa composition peut être variable, ce qui permet d'obtenir un béton répondant à des besoins spécifiques. Aujourd'hui, un nouveau matériau BAP apparu dans les années 90. Il représente un avantage particulier par rapport au béton ordinaire qui, se propage dans le renforcement confiné, atteint tous les coins du coffrage et est consolidé sous son seul propre poids. Le béton auto plaçant (BAP) offre une excellente capacité de remplissage et présente une bonne résistance à la rupture et une bonne résistance aux essais mécaniques. Il est utilisé dans les domaines de recherche industrielle, les entreprises, les usines de préfabrication pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil.

La caractérisation mécanique du BAP s'est limitée pendant plusieurs années aux essais standards, qui présentent par fois un travail fastidieux, et dans d'autres cas une caractérisation qui ne tient pas compte des conditions réelles d'utilisation du béton, surtout dans le domaine industriel. On assiste actuellement à l'utilisation des moyens plus significatifs pour simuler le comportement mécanique des matériaux à des situations plus réalistes.

La technique d'indentation est largement répandue dans les laboratoires industriels. Actuellement, elle est devenue un instrument de base pour caractériser les propriétés mécaniques de différents matériaux. La caractérisation du béton (BAP) dépend de l'état de surface, donc de la méthode de préparation. Pour pouvoir visualiser précisément la qualité d'image du (BAP) après chaque test d'indentation, la forme du béton doit être plate et convenablement poli.

Le béton est qualifié d'autoplaçant lorsque le matériau final répond à certaines exigences à l'état frais et à l'état durci. Ainsi, sa formulation doit au moins contenir un adjuvant chimique et un ajout minéral pour satisfaire les conditions de maniabilité et de stabilité.

Le mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à deux parties : une étude et description générale, et en particulier le béton auto plaçant (BAP). Nous distinguons quelques notions historiques, définitions, Domaine d'utilisation, Caractérisation du BAP.

Et la deuxième partie :

La rhéologie, Paramètres rhéologiques, Rhéologie des différents et Modèles rhéologiques matériaux cimentaires modèle de Bingham, Modèle de Herschel-Bulkley, Mesure de la rhéologie du béton Rhéologie du Béton autoplaçant (BAP), Simulations numériques d'écoulement du béton frais.

Le deuxième chapitre présente : introduction, simulation flow 3d, présentation de logiciel, caractérisation et méthodologie d'essais, matériaux de base utilisés, formulation du béton (BAP), Rhéomètre, Caractérisation à l'état frais, Boite en Rhéologie.

Le troisième chapitre présente : S'appuyant sur les résultats expérimentaux et de simulation.

Et finalement, une conclusion générale soulignera les résultats les plus marquants de ce travail, et proposera les différents objectifs à viser pour les futures études.

CHAPITRE 1

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction :

Le béton est devenu un matériau omniprésent, tant dans le monde de la construction que dans d'autres domaines tels que l'art. A la fois économique et facilement manipulable, le béton répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité et sa résistance font de lui un matériau incontournable dans le domaine de la construction. Sa composition peut être variable, ce qui permet d'obtenir un béton répondant à des besoins spécifiques. Aujourd'hui, un nouveau matériau BAP apparu dans les années 90. Il représente un avantage particulier par rapport au béton ordinaire qui, se propage dans le renforcement confiné, atteint tous les coins du coffrage et est consolidé sous son seul propre poids. Le béton auto plaçant (BAP) offre une excellente capacité de remplissage et présente une bonne résistance à la rupture et une bonne résistance aux essais mécaniques. Il est utilisé dans les domaines de recherche industrielle, les entreprises, les usines de préfabrication pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil.

2. Béton autoplaçant (BAP)

2.1 Introduction (historique)

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux à haute performance qui se caractérisent essentiellement par leur fluidité à l'état frais et leur homogénéité à l'état durci. Ces bétons ont la capacité de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport de vibration même dans les coffrages très ferraiillés. L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo.

Le béton autoplaçant, aussi nommé béton auto-nivelant (BAN) ou bien béton autocompactant, est un béton se différenciant des autres par son **importante fluidité**. Une caractéristique ayant longtemps été recherchée dans le domaine de la construction afin de faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers. Il était fréquent de rajouter de l'eau au mélange afin d'obtenir un béton plus fluide mais cela le **fragilisait**. C'est pourquoi le BAP est une véritable révolution. Apparu dans les années 1980 au Japon, il s'est développé en France à la fin des années 1990. Si le béton autoplaçant possède une telle fluidité, c'est grâce aux divers **adjuvants super plastifiants** qui le composent. Ceci a rendu les constructions plus sûres et a grandement facilité les méthodes de mise en œuvre du béton.

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont

réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océan polis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferrillées. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication.

Les chercheurs et les industriels Japonais n'ont pas tout de suite publié leurs recherches. La viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée. Plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacré. Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans. Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçants dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles.

2.2 Définition des bétons autoplaçants :

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons spéciaux, ils sont très fluides, très déformables, homogènes et stables. La caractéristique principale de ces bétons réside dans le fait qu'ils se mettent en place sous le seul effet de la gravité.

Les (BAP) offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation, ils présentent des résistances et une durabilité analogue à celles des bétons ordinaires, dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais.

2.3 Domaine d'utilisation 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 [6]. 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 des structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- ✓ Formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- ✓ Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- ✓ Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- ✓ Possibilité de coulage de zones fortement ferrillées.

- ✓ Exigences architecturales et qualité de parement particulière.

2.4 Caractérisation du BAP

La forte fluidité reste la principale caractéristique du béton autoplaçant. Cela lui permet de se répandre tout seul par simple déversement. Il présente un coulage facile et ne nécessite pas de compactage.

Le béton autoplaçant est aussi un matériau qui jouit d'une bonne stabilité et homogénéité.

C'est donc un béton qui affiche :

- Une bonne déformabilité.
- Une bonne stabilité.
- Un bon coulage.

2.5 Propriétés d'un BAP à l'état frais

Pour pouvoir le qualifier d'autoplaçant, il faut s'assurer que le béton possède une très bonne capacité de remplissage qui résulte d'une déformabilité et d'une résistance à la ségrégation.

➤ Capacité de remplissage :

Le béton autoplaçant doit pouvoir remplir les coffrages les plus densément armés et sans l'intervention humaine (pour la mise en place). Même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Le remplissage est lié à la capacité de déformation de béton et le temps d'écoulement. Le test d'étalement au cône d'Abrams et L'essai Orimet qui a été développé à l'Université de Paisley donne des indications sur les deux aspects.

➤ La résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions. Le BAP peut souffrir de la ségrégation durant la mise en place et après mais avant son durcissement, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées donc il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée par l'ajout de certains agents de viscosité.

➤ La capacité de passage :

C'est la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage. En définissant la capacité de passage, il faut prendre en considération, la géométrie et la densité du ferrailage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulat, blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de trois dispositifs, le cône d'Abrams en présence du J-Ring, la boîte en L (L-Box) et la boîte en U (U-Box).

2.6 Caractérisation des BAP

2.6.1 Essai d'étalement :

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP

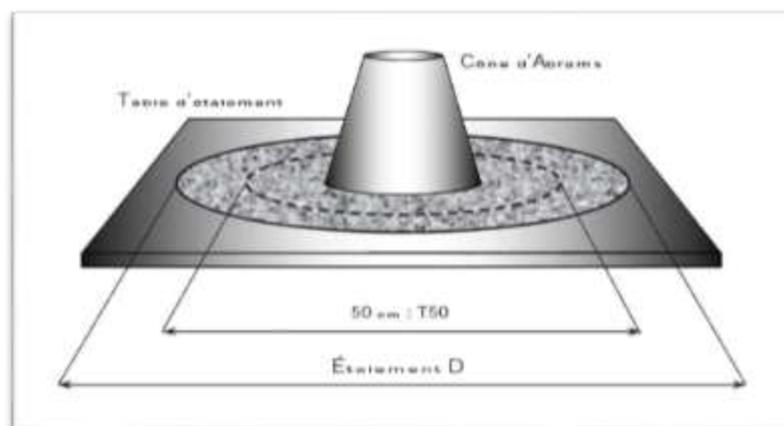


Figure 1.1 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)

Essai écoulement J-ring

L'essai d'écoulement J-ring est utilisé pour déterminer l'aptitude à l'écoulement, la propagation de l'écoulement et le temps d'écoulement t_{500} du béton autoplaçant à travers l'appareil J-Ring.

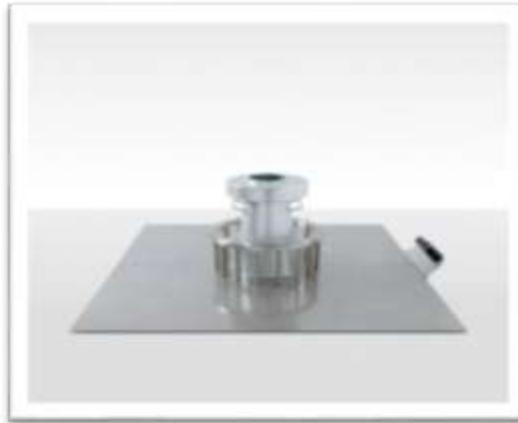


Figure I-2 : Essai J. Ring

UTC-0520E J-Ring avec barres de $\varnothing 18\text{mm}$ x 16 fabriquées en acier inoxydable.

UTC-0522E Cône en acier protégé contre la corrosion avec diamètre supérieur 100, et base 200 mm, hauteur 300 mm

UTC-0524 Plaque de base carrée 900x900x3 mm, en acier inoxydable avec cercles gravés de 210 et 500 mm conformément à EN 12350-8.

UTC-0526E Rehausse utiliser pour stabiliser le cône.

Appareillage minimum pour réaliser un essai J-ring est le J-ring et le cône.

TABLEAU I-1 : DIMENSIONS ET POID DE CONE

Code produit	Dimensions	Poids
UTC-0520E	350x350x140 mm	10 kg
UTC-0522E	200x200x300 mm	2kg
UTC-0524	920x920x18 mm	21kg
UTC-0526E	250x250x50 mm	10kg

2.6.2 Essai de la boîte en L (L-box test) :

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. La partie verticale du L (Figure 1.4) est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres \varnothing 14) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres).

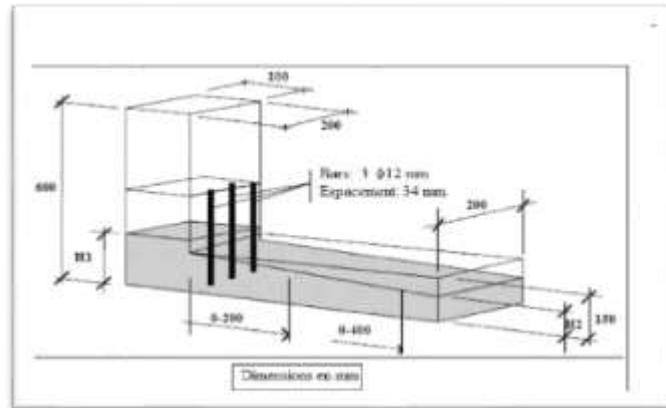


Figure 1.3 : Essai de la boîte en L (L-box test)

Pour que le béton autoplaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H/L_{max}) doit être supérieur à 0,8. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

2.6.3 Essai à la boîte en U (U-Box)

Il est utilisé au Japon et en Angleterre, le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L, le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte, une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise

L'essai de la boîte en U permet de caractériser 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 blocages inacceptables.

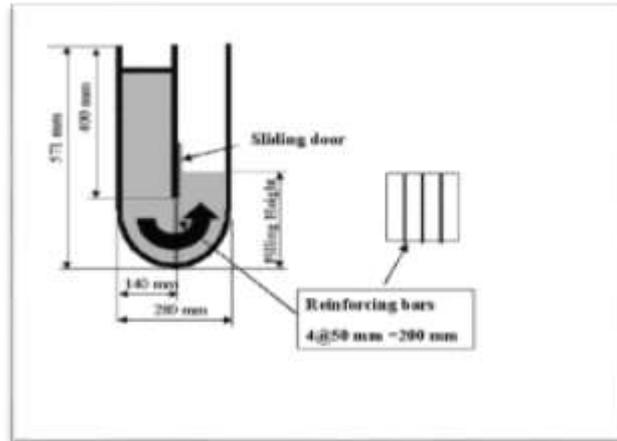


Figure 1.4 : ESSAI DE BOÎTE EN U ('U-BOX TEST')

2.6.4 Essai de stabilité au tamis :

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons Autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

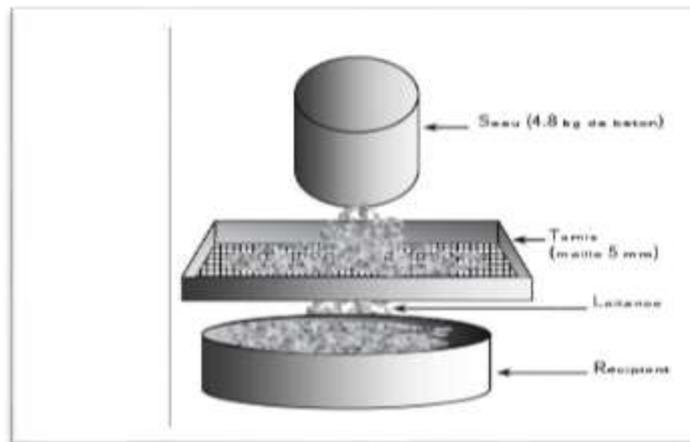


Figure 1.5 : Essai de stabilité au tamis

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm

2.6.5 Essai d'entonnoir (V-Funnel NF EN 12350-9)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante, l'entonnoir dont les dimensions sont définies sur la figure et rempli de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire

jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP.

Le temps d'écoulement au V-Funnel dépend également du type d'application, mais n'est groupé que selon 2 classes :

- ✓ Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10s.
- ✓ Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27s.

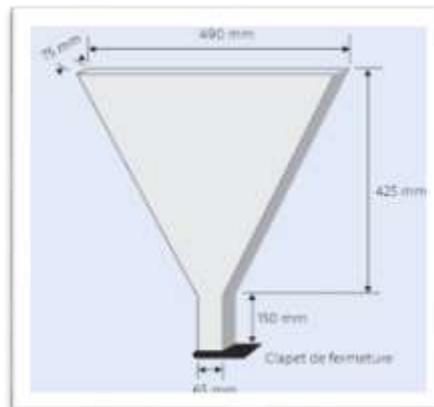


Figure 1-6 : L'essai V-funne

2.6.6 Essai à la colonne :

Cet essai a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley (en 2002) et par l'Université de Ghent (en 2001). Il s'agit de remplir une colonne et de laisser le matériau au repos pendant 1min, après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses, les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés, chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés.

Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

- Si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation
- Si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps.

2.7 Propriétés d'un BAP à l'état durci (destructif et non destructif)

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- a) Les essais non destructifs :
 - Essai au scléromètre
 - Essai d'auscultation dynamique
- b) Les essais destructifs :
 - Les essais de compression
 - Les essais de traction par flexion
 - Module d'élasticité

3. LA RHEOLOGIE

La rhéologie est l'étude de l'écoulement de la matière, principalement à l'état liquide ou gazeux, mais aussi en tant que "solides mous" ou solides dans des conditions dans lesquelles ils répondent avec un écoulement plastique plutôt que de se déformer élastiquement en réponse à une force appliquée. La rhéologie est une branche de la physique, et c'est la science qui traite de la déformation et de l'écoulement des matériaux, solides et liquides.

Le terme rhéologie a été inventé par Eugene C. Bingham, professeur au Lafayette College, en 1920, à partir d'une suggestion d'un collègue, Markus Reiner. Le terme s'inspire de l'aphorisme de Simplicius (souvent attribué à Héraclite), pantarhei et a d'abord été utilisé pour décrire l'écoulement des liquides et la déformation des solides. Elle s'applique aux substances qui ont une microstructure complexe, telles que les boues, les boues, les suspensions, les polymères et autres formateurs de verre (par exemple, les silicates), ainsi que de nombreux aliments et additifs, les fluides corporels (par exemple, le sang) et d'autres matériaux biologiques, et à d'autres matériaux qui appartiennent à la classe des matières molles comme les aliments.

Les fluides newtoniens peuvent être caractérisés par un seul coefficient de viscosité pour une température spécifique. Bien que cette viscosité change avec la température, elle ne change pas avec la vitesse de déformation. Seul un petit groupe de fluides présente une viscosité aussi constante. La grande classe de fluides dont la viscosité change avec le taux de déformation (la vitesse d'écoulement relative) est appelée fluides non newtoniens.

La rhéologie tient généralement compte du comportement des fluides non newtoniens, en caractérisant le nombre minimum de fonctions nécessaires pour relier les contraintes au taux de changement de déformation ou aux taux de déformation. Par exemple, le ketchup peut voir

sa viscosité réduite par agitation (ou d'autres formes d'agitation mécanique, où le mouvement relatif des différentes couches du matériau provoque en fait la réduction de la viscosité), mais pas l'eau. Le ketchup est un matériau rhéofluidifiant, comme le yogourt et la peinture en émulsion (terminologie américaine peinture au latex ou peinture acrylique), présentant une thixotropie, où une augmentation de la vitesse d'écoulement relative entraînera une réduction de la viscosité, par exemple par agitation. Certains autres matériaux non newtoniens présentent le comportement opposé, la rhéopectie : la viscosité augmente avec la déformation relative, et sont appelés matériaux épaississants par cisaillement ou dilatants. Depuis que Sir Isaac Newton est à l'origine du concept de viscosité, l'étude des liquides dont la viscosité dépend de la vitesse de déformation est également souvent appelée mécanique des fluides non newtonienne.

La caractérisation expérimentale du comportement rhéologique d'un matériau est connue sous le nom de rhéométrie, bien que le terme rhéologie soit fréquemment utilisé comme synonyme de rhéométrie, en particulier par les expérimentateurs. Les aspects théoriques de la rhéologie sont la relation entre le comportement d'écoulement/déformation du matériau et sa structure interne (par exemple, l'orientation et l'allongement des molécules de polymère), et le comportement d'écoulement/déformation des matériaux qui ne peuvent pas être décrits par la mécanique des fluides classique ou l'élasticité.

3.1 Paramètre rhéologie

3.1.1 Viscosité

On considère idéalement un liquide au repos comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumise à une contrainte tangentielle. Si une des couches du liquide se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (figure 1.1), en raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, le mouvement est transmis partiellement à cette dernière en même temps que la vitesse de déplacement de la première couche diminue. Cet effet de retard, provoqué par la friction interne des molécules de la couche sous-jacente sur celle de la couche supérieure, est appelé viscosité μ [Pa.s]. Donc, la viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, sa connaissance suffit à caractériser de façon précise son comportement rhéologique (Courrazé G., GrossiordJL).

Il existe quatre types de viscosité énumérés dans le tableau I.2

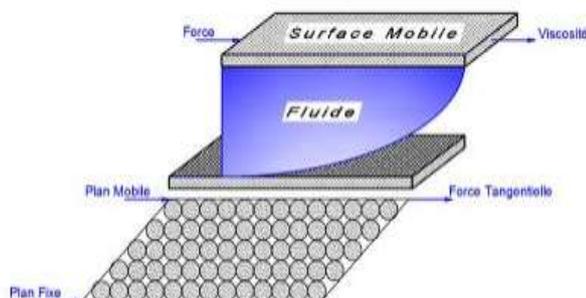


Figure 1-7 : Schéma glissement des couches.

TABLEAU I-2. Quatre types de viscosité.

Type de viscosité	Définition	Expression	Dépendance
Viscosité Dynamique η	Résistance au mouvement due aux frottements moléculaires internes, résistance que les molécules de ce fluide opposent aux forces de dissociation et au mouvement	Pour un fluide idéal, la loi de Newton donne: $\tau = \eta \dot{\gamma}$ (Pa.s) Pour les fluides dits non – Newtoniens la grandeur est la viscosité apparente	Essentiellement de la cohésion et du taux de transfert de quantité de mouvement entre les molécules
Viscosité cinétique ν	Doit son origine à l'utilisation des viscosimètres capillaires utilisant le temps d'écoulement sous l'effet de la pesanteur, qui intègre la masse spécifiques de la substance	Temps d'écoulement $\nu = \eta / \rho$ avec ρ la densité du liquide et η sa viscosité (en stokes ou m^2 / s)	De la densité du liquide et de sa viscosité
Viscosité relative η_R	Correspond au rapport de la viscosité dynamique de cette solution sur la viscosité dynamique du solvant	$\eta_R = \eta / \eta_s$	
Viscosité spécifique η_{sp}	Correspond à la viscosité d'une dispersion colloïdale diluée de particules sphériques	$\eta_{sp} = \eta_R - 1$	

3.1.2 Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement τ est la variation de la force de cisaillement par rapport à la surface cisailée, comme définie par l'équation :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (1)$$

Où

dF : projection de la force de frottement tangentielle.

dS : surface élémentaire d'une couche cisillée.

3.1.3 Le taux de cisaillement

Lorsque le fluide s'écoule en régime laminaire comme le cas d'un écoulement couette, la répartition des vitesses dans l'entrefer suit une loi linéaire entre deux plans parallèles, dont l'un se déplace à une vitesse constante et l'autre est stationnaire. Il se crée un gradient de vitesse entre les deux plans.

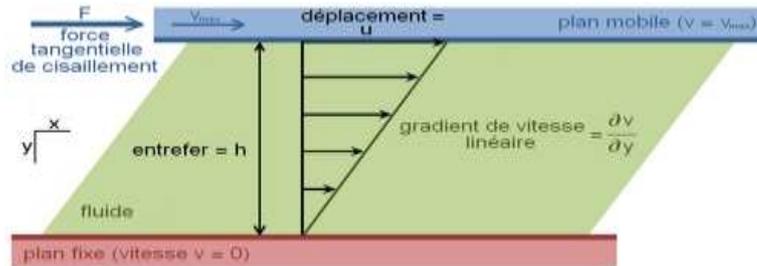


Figure 1-8 : Ecoulement d'un fluide en régime laminaire, en cisaillement plan

Le déplacement (γ) entre les deux plans est défini comme la déformation $\gamma = \frac{dx}{dy}$. Le taux de cisaillement ou la vitesse de déformation ($\dot{\gamma}$) [1/s] est définie comme la vitesse de déformation entre deux couches successives voisines du fluide cisillé. Elle est souvent définie comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{d}{dy} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

3.1.4 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme étant la contrainte de cisaillement minimale à atteindre pour qu'un fluide soumis à une déformation de cisaillement s'écoule. En dessous de cette valeur, cette mixture se comporte comme un pseudo-solide (pas de

déformations permanentes) .DeLarrard et al[24]ont considéré que le seuil de cisaillement τ_0 [Pa] est la manifestation macroscopique du frottement entre les grains composant le squelette granulaire du béton y compris les grains de ciment et les particules ultrafines (figure1.5).

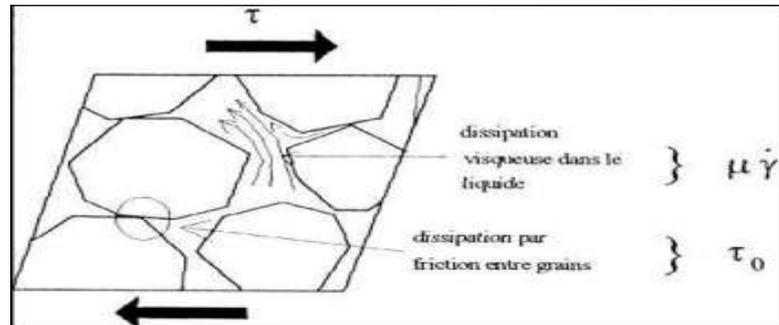


Figure 1-9 : Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [24]

τ : contrainte de cisaillement [Pa]

μ : viscosité [Pa.s]

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

3.1.5 Thixotropie

Un fluide est thixotrope si, sa viscosité, à vitesse de cisaillement constante, diminue au cours du temps à condition que ce phénomène soit réversible.

Le comportement thixotrope concerne les corps fluidifiants et les corps plastiques.(plus rarement les épaississants).

Pour les corps plastiques, on peut avoir au cours de la modification de structure, un changement de contrainte seuil ou pas

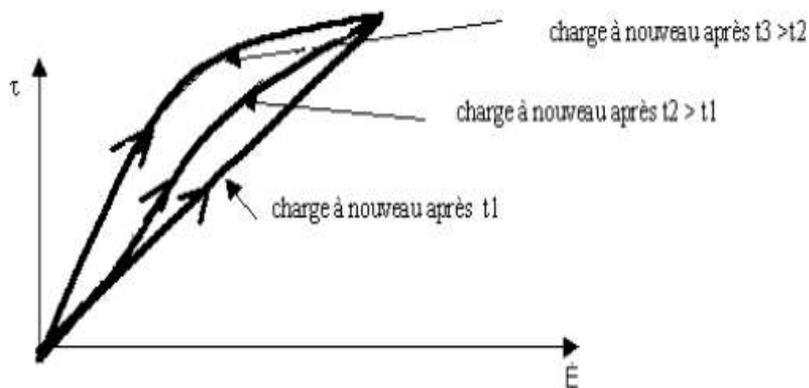


Figure 1-10 : Comportement d'un corps thixotrope.

3.2 RHEOLOGIE DIFFERENTDES MATERIAUX CIMENTAIRES

La bonne performance des matériaux à base de ciment dépend de leur facilité à transporter et coulé à l'état frais. Les procédés les plus importants utilisant des matériaux cimentaires sont transport, pompage, coulée, injection, pulvérisation (projection de béton), auto nivelant, manuel treuillage, moulage, consolidation et finition. Toutes ces applications pratiques dépendent de la rhéologie des mélanges, selon différents aspects :

- Fluidité sur les surfaces compte tenu de la résistance au frottement.
- Adhérence.
- Résistance au ressuage de l'eau, suite au tassement des particules les plus grossières.
- Résistance contre l'hétérogénéité induite par le cisaillement des particules plus grossières pendant l'écoulement.
- Résistance au blocage des grosses particules dans les interstices étroits du coffrage.
- Des teneurs en eau plus faibles, afin d'obtenir une plus grande résistance mécanique, ainsi que moins porosité et, par conséquent, des propriétés de durabilité plus élevées.
- Faible pression latérale exercée sur le coffrage.

En conséquence, cette section traite de la rhéologie des matériaux à base de ciment, y compris le ciment pâte, mortier et béton à l'état frais.

3.2.1 Rhéologie de la pâte de ciment

La pâte de ciment est une suspension hautement concentrée de ciment et d'autres particules de poudre dans l'eau.

Les particules de ciment sec couvrent une large gamme de taille (1 à 100 μm) et différents produits chimiques et composants minéraux qui réagissent avec l'eau. Ces réactions peuvent être très rapides (comme la réaction de l'aluminate tricalcique et de l'alumino-ferrite tricalcique), ou prendre des temps plus longs. Pour exemple, le silicate tricalcique et les silicates dicalciques réagissent en quelques jours et plusieurs mois, respectivement. Le béton frais peut être coulé avant le processus de prise, qui consiste en la croissance et imbrication de cristaux aciculaires de sulfoaluminate de calcium et de silicate de calcium hydrater. Selon la présence de la peau d'hydratation autour des particules de ciment, la fraîcheur les propriétés de la pâte de ciment sont relativement insensibles aux variations de la composition chimique² du clinker de ciment, tandis que la teneur en eau a des effets plus significatifs. Par conséquent,

L'augmentation du rapport eau / matériaux cimentaires peut entraîner une diminution de la viscosité du plastique et limite d'élasticité de la pâte de ciment. Les autres paramètres influant sur la rhéologie du ciment les mélanges de pâtes peuvent être résumés comme suit :

- Âge et température, compte tenu de la dégradation de la structure interne
- Composition et finesse du ciment.
- Matériaux supplémentaires, tels que cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau et métakaolin
- Les adjuvants chimiques, tels que les superplastifiants

Selon la littérature, les paramètres rhéologiques Bingham des mélanges de pâte de ciment peuvent aller de 10 à 100 Pa et de 0,01 à 1 Pa.s pour les valeurs de limite élastique et de viscosité plastique, respectivement .

3.2.2 Rhéologie du mortier de ciment

Le mortier de ciment est une suspension d'agrégats fins (c'est-à-dire de sable), avec des diamètres de particules inférieurs à 5mm, en pâte de ciment. Selon les tailles plus grandes des particules dans la matrice de mortier par rapport à la pâte de ciment, les forces d'enclenchement entre les particules peuvent augmenter les valeurs de paramètres rhéologiques du mélange. L'effet de la présence de particules sur la rhéologie de la matrice de mortier est plus dominant que la répartition structurelle. Les gammes typiques de La limite d'élasticité de Bingham et la viscosité plastique du mortier varient de 80 à 400 Pa, et de 1 à 3 Pa.s, respectivement.

3.2.3 Rhéologie du béton

–Le mélange de béton est une suspension d'agrégats grossiers (plus de 5 mm) dans la matrice de mortier. En conséquence, on pourrait s'attendre à ce que la rhéologie du béton frais soit plus complexe que pâte et mortier de ciment, en raison d'une plus large gamme de tailles, de formes et de compositions de particules. Plus des études sur la rhéologie des bétons conventionnels ont porté sur les effets de différents constituants des mélanges, tels que ciment, cendres volantes, fumée de silice, autres poudres de remplissage, eau aux matériaux cimentaires et autres adjuvants. Par exemple, l'effet typique de différents composants du mélange sur la rhéologie du béton frais est présenté sur la Fig.

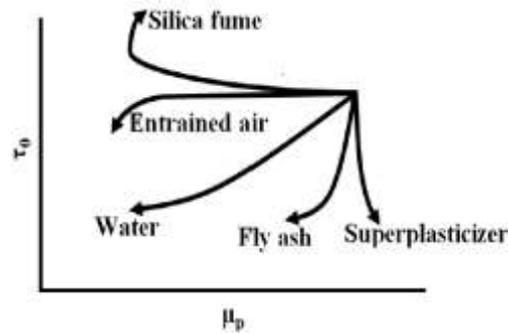


Figure 1-11 : différents composants du mélange sur la rhéologie du béton frais

Sens du changement de rhéologie d'un béton typique causé par une augmentation le montant du paramètre noté est indiqué par les flèches, Comme on peut l'observer sur la Fig. 1.1 l'augmentation de la teneur en eau peut diminuer de manière significative à la fois le rendement les valeurs de contrainte et de viscosité plastique du mélange. D'autre part, la viscosité plastique peut diminuer significativement en augmentant la teneur en fumée de silice et en air entraîné, tout en gardant constantes les valeurs de limite d'élasticité. De plus, l'augmentation des teneurs en cendres volantes et en super plastifiant.

Le dosage diminue les valeurs de limite d'élasticité, mais un petit changement de la viscosité plastique des mélanges.

Selon la littérature, les paramètres rhéologiques du béton conventionnel peuvent varier de 500 à 2000 Pa et 50 à 100 Pa.s pour les valeurs de limite d'élasticité et de viscosité plastique, respectivement .

La mesure rhéologique peut être utilisée comme outil de contrôle de la qualité du béton frais, qui peuvent également indiquer les changements dans les compositions de mélange. Ces changements peuvent affecter les propriétés du béton durci et ses performances structurelles et sa durabilité

3.3 Les modèles rhéologiques

Il existe différents modèles qui permettent de caractériser le comportement des fluides non-newtonien. Ceci permet parfois de mettre en avant une contrainte seuil ou bien un comportement rhéoépaississant ou rhéofluidifiant. Nous nous limiterons ici à la description des modèles sans décrire les mécanismes moléculaires qui régissent ces lois.

3.3.1 Le modèle de Bingham :

Certains matériaux présentent une viscosité infinie jusqu'à ce qu'une contrainte suffisamment élevée soit appliquée pour initier le flux. Au-dessus de cette contrainte (c'est-à-dire la limite d'élasticité), le matériau présente alors un écoulement newtonien simple.

Le modèle le plus simple couvrant ces types de fluides viscoplastiques avec une réponse au rendement est l'idéal modèle de Bingham, et s'exprime par le modèle à deux paramètres suivants :

$$\tau = \tau_0 + \mu p \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

Où, τ_0 et μp sont respectivement les paramètres de limite d'élasticité de Bingham et de viscosité plastique.

τ_0 : seuil de cisaillement

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement en s

Le modèle de Bingham peut décrire les caractéristiques de viscosité d'un fluide à limite d'élasticité dont la viscosité est indépendante du taux de cisaillement. Par conséquent, le modèle plastique de Bingham n'a pas la capacité à gérer les caractéristiques de fluidification par cisaillement des fluides généraux non newtoniens. Beaucoup les suspensions de particules concentrées et les systèmes colloïdaux, tels que le mortier et le béton, présentent Comportement de Bingham à des plages limitées de taux de cisaillement.

3.3.2 Le modèle d'Hershel-Buckley :

Le modèle de Hershel-Buckley est le modèle utilisé par Fluent pour décrire les plastiques de Bingham, c'est donc le modèle que nous avons utilisé lors de nos simulations.

Ce modèle est au croisement entre le modèle de Bingham et celui de Ostwald.

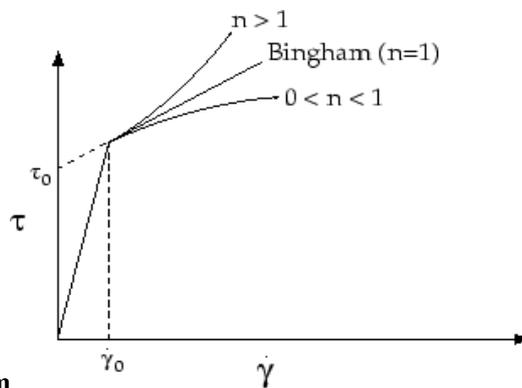


Figure 1.12 : modèle de Bingham

On voit apparaître ici un cisaillement critique avant lequel le comportement du fluide est linéaire. Cette valeur n'est pas nul car autrement cela créerait des erreurs numériques. Pour les valeurs de cisaillement faible, le fluide se comporte alors comme un fluide extrêmement visqueux.

Dans nos simulations nous prendrons donc une valeur de cisaillement critique très faible afin de représenter le mieux possible le comportement d'un fluide de Bingham.

3.4 MESURE DE LA RHEOLOGIE DU BETON

Les propriétés rhéologiques (d'écoulement) du béton sont importantes pour l'industrie de la construction car le béton est généralement mis en place sous sa forme plastique. Cette importance peut être attestée par l'abondante littérature existante sur la rhéologie du béton.

Malheureusement, en raison de la composition complexe du matériau, il n'existe aucune méthode définie pour prédire l'écoulement du béton à partir de ses composants. Même les mesures des paramètres rhéologiques ne sont pas facilement réalisées en raison de la large gamme de tailles de particules trouvées dans le béton (de 1 mm de grains de ciment à 10 mm de gros granulats ou même plus (100 mm) comme dans un barrage). Par conséquent, l'écoulement d'un béton donné est généralement mesuré à l'aide de l'un des nombreux tests standards disponibles qui ne mesurent que partiellement les propriétés d'écoulement intrinsèques du matériau. Les essais d'écoulement ont une valeur limitée à moins qu'ils ne mesurent les propriétés rhéologiques intrinsèques du béton. Une meilleure compréhension des propriétés d'écoulement du béton est nécessaire pour pouvoir prédire l'écoulement du béton à partir des propriétés des composants.

3.5 RHEOLOGIE DES FLUIDES ET DES SUSPENSIONS :

Le béton et le mortier sont des matériaux composites dont les principaux composants sont les granulats, le ciment et l'eau. Le béton est en réalité une suspension concentrée de particules solides (agrégats) dans un liquide visqueux (pâte de ciment). La pâte de ciment n'est pas un fluide homogène et est elle-même composée de particules (grains de ciment) dans un liquide.

Comme le béton, à l'échelle macroscopique, s'écoule comme un liquide, l'équation s'applique. Si une force de cisaillement est appliquée à un liquide comme le montre la figure, un gradient de vitesse est induit dans le liquide. Le facteur de proportionnalité entre la force et le gradient s'appelle la viscosité. Le gradient de vitesse est égal au taux de cisaillement $\dot{\gamma}$. Un liquide qui obéit à cette équation est appelé Newtonien :

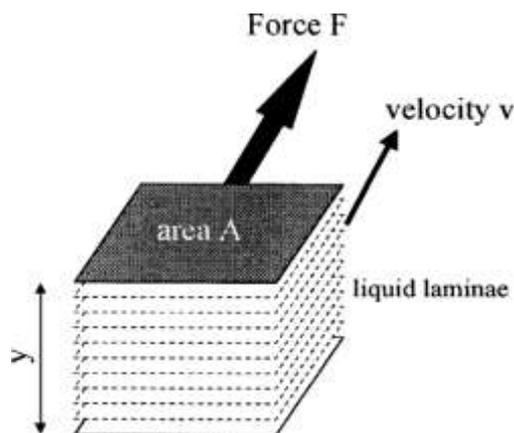
$$F/A = \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

$\dot{\gamma}$ = taux de cisaillement = dv/dy

τ = contrainte de cisaillement = F/A

F = force de cisaillement

A = aire du plan parallèle à la force



3.6 Rhéologie du béton autoplaçant (BAP)

Dans le cadre du projet national béton autoplaçant, le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées a proposé et testé des méthodes de caractérisation de la thixotropie sur chantier. Les notions de rhéologie nécessaires à la compréhension du phénomène de thixotropie sont d'abord rappelées. Le chantier expérimental de Guerville est ensuite présenté. Le programme d'essais réalisé et les résultats obtenus sont décrits. L'existence d'un phénomène de structuration (ou floculation) dû à la thixotropie est constatée. Il apparaît également que la mesure de « l'amplitude » de cette structuration n'est pas suffisante pour décrire les variations de rhéologie des bétons autoplaçants (BAP), mais que la cinétique d'évolution du phénomène joue aussi un rôle important. Selon les protocoles d'essai adoptés, la part « structuration »

peut ou non être dissociée de la part « vieillissement » du matériau. Des indices permettant de quantifier les deux phénomènes sont définis.

Le comportement des bétons autoplaçants, comme celui de nombreuses autres suspensions de particules, peut être décrit par un modèle d'Hershel-Bulckley [1, 2]. Celui-ci fait intervenir trois paramètres intrinsèques (τ_0 , k , n) qui permettent de décrire l'écoulement en régime permanent du matériau si celui-ci reste homogène (pas de ségrégation des particules). La contrainte de cisaillement τ (Pa) est alors reliée au taux de déformation $\dot{\gamma}$ (s⁻¹) par la relation suivante : $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$ (1) où τ_0 est le seuil de cisaillement du matériau et k un paramètre de viscosité. Si $n < 1$, le matériau est dit rhéofluidifiant ; si $n > 1$, le matériau est dit rhéoépaississant ; si $n = 1$, le modèle est dit de Bingham. Ces paramètres sont accessibles à l'aide de rhéomètres à béton [3, 4] tels que le BTRhéom développé au LCPC [5] et adapté aux BAP par Sedran. De Larrard et al. ont montré que les bétons étaient, dans leur grande majorité, des matériaux rhéo-fluidifiants. De plus, les agents viscosants entrant fréquemment dans la composition des bétons autoplaçants accentuent le caractère thixotrope des bétons obtenus. Il peut être utile de rappeler ici la définition de la thixotropie donnée par le dictionnaire de Rhéologie [8]. Un corps est dit thixotrope si deux conditions sont remplies : n après un long repos, τ (ou $\dot{\gamma}$) étant brusquement appliquée puis maintenue fixe, la viscosité apparente est fonction décroissante de la durée d'écoulement ; o le corps retrouve son état initial après un repos assez long. Cette évolution de la viscosité au cours du temps peut être expliquée par une diminution réversible de l'état de floculation (déstructuration) des particules de ciment soumises à un cisaillement. Au repos, cette floculation réapparaît et le matériau semble se figer (structuration). Dans la littérature, ce phénomène a tout d'abord été appelé « abnormal setting » (prise anormale) des bétons . Il n'a cependant rien à voir avec un phénomène de prise puisque des matériaux telle que la bentonite présente un comportement similaire sans pour autant subir de réaction d'hydratation. Ce phénomène a été récemment analysé, autant d'un point de vue qualitatif que quantitatif, par Jarny et al. dans le cas de pâtes de ciment blanc. La réversibilité du phénomène mérite que l'on s'y attarde. En effet, la viscosité apparente d'un béton autoplaçant peut aussi évoluer au cours du temps sous l'effet d'une activation lente d'un adjuvant ou, à moyen terme, à cause du processus d'hydratation du ciment. Ces évolutions sont irréversibles. Un simple malaxage suffisamment vigoureux peut « effacer » les conséquences d'un long temps de repos sur l'état de floculation d'un matériau alors qu'aucun malaxage ne peut inverser les réactions physico-chimiques. Dans

l'étude du comportement des BAP, il est donc primordial de dissocier la thixotropie (phénomène réversible) du vieillissement (phénomène irréversible). La thixotropie n'affecte en rien l'étude du comportement en régime permanent, c'est-à-dire en écoulement établi des BAP (pompage, malaxage, écoulement dans une goulotte lors de la vidange d'un camion toupie), qui peut être décrit à l'aide du modèle d'Hershel-Bulkley. Elle doit cependant être prise en compte dans l'étude des régimes transitoires qui sont majoritaires lors des phases de mise en œuvre (remplissage d'un coffrage, coulage d'une dalle et même repos du matériau, pendant lequel l'état de floculation augmente). Dans la pratique, les essais permettant de caractériser le comportement des BAP sont des essais de chantiers simples et peu coûteux sur lesquelles portent les recommandations provisoires de l'Association française de génie civil [12]. Celles-ci portent sur trois caractéristiques de ces matériaux : n leur aptitude à remplir un coffrage, évaluée à l'aide de l'essai d'étalement au cône ; o leur aptitude à franchir une zone ferrillée, évaluée à l'aide de l'essai à la L-Box ; p leur stabilité vis-à-vis de la ségrégation statique, évaluée à l'aide de l'essai au tamis. Les deux premiers essais correspondent à des écoulements transitoires et sont donc affectés par la thixotropie. Le dernier essai concerne le caractère éventuellement hétérogène du matériau et ne fournit donc pas d'informations sur le comportement en écoulement du matériau lorsqu'il reste homogène. Finalement, une valeur d'étalement au cône comprise entre 600 et 750 mm et une valeur de L-Box comprise entre 0,8 et 1 sont les seules informations disponibles sur un chantier où un béton conforme aux recommandations provisoires de l'AFGC est mis en œuvre. Comme on le verra, ces deux valeurs sont insuffisantes pour décrire la palette des comportements possibles au vu de la complexité des phénomènes physiques mis en jeu. Il semble nécessaire de préciser ici quelques notions importantes pour la suite de ce travail. Comme indiqué dans la définition précédente, la thixotropie est l'association de deux phénomènes : une structuration (ou floculation) et une déstructuration (ou défloculation) sous écoulement. Physiquement, chacun de ces phénomènes peut être caractérisé par une amplitude et un temps caractéristique. Au moins quatre paramètres sont ainsi nécessaires pour décrire le caractère thixotrope d'un mélange (c'est d'ailleurs le nombre minimal de paramètres utilisé dans les modèles de thixotropie de la littérature). La grande majorité des suspensions sont thixotropes. Un fluide à seuil simple peut être considéré comme un matériau thixotrope avec des temps caractéristiques de structuration et de déstructuration très courts. Ainsi, sa réponse à une sollicitation atteint très rapidement le régime permanent et semble ne pas dépendre de son

histoire. De la même manière, tous les bétons sont thixotropes et, pourtant, dans la pratique, on parle de bétons thixotropes et de bétons qui ne le sont pas. La constatation suivante peut être faite : de manière générale (et de manière abusive) on appelle « béton thixotrope » un béton dont les amplitudes de structuration et de déstructuration sont grandes et associées à un temps caractéristique de structuration court et un temps caractéristique de déstructuration long.

4. Simulations numériques d'écoulement du béton frais

Dans le cas d'un béton autoplaçant (BAP) injecté par le bas de coffrage, La pression latérale exercée sur ce dernier est nettement plus importante que celle dans le cas d'un coulage traditionnel : en plus de la pression hydrostatique exercée par le béton frais, il faut aussi tenir compte des pertes de charges linéaires dues au contact fluide/paroi. Il a été également constaté que l'influence positive de la thixotropie (floculation des grains de ciment) n'intervient pas dans ce type de coulage, contrairement aux techniques traditionnelles, précisément sur la partie supérieure à la pipe d'injection [TIC 14] [TIC 15]. Pour éviter l'effondrement du coffrage pendant le coulage du BAP, cette pression devrait être prédite. Contrairement au calcul analytique, Le calcul numérique est très couteux en termes de temps, et nécessite des moyens et des connaissances spécifiques sur la modélisation numérique. Il existe Peu de travaux dans la littérature qui s'intéresse au développement des modèles analytiques pour prédire la pression latérale maximale exercée sur le coffrage. Tichko et all [TIC 15] avaient proposé un modèle analytique pour prédire cette pression,

cela en se basant sur la loi de Bernoulli généralisée, la loi de Darcy-Weisbach et le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley, tout en supposant que l'écoulement est laminaire et le fluide est viscoplastique. En outre, ce modèle prend en compte, à la fois, du diamètre hydraulique, pour représenter la section du coffrage, ainsi que du débit d'injection, pour prédire la vitesse moyenne du coulage qui est un élément essentiel pour calculer la pression due aux pertes de charges linéaires. Cependant, en se basant sur ces derniers paramètres, le diamètre hydraulique et le débit, on est en train de supposer, de manière indirect, que la vitesse moyenne d'écoulement dans des coffrages qui ayant des sections différentes mais des diamètres hydrauliques égaux est la même, à titre d'exemple, un coffrage avec une section carré ($X \times X$) et un autre coffrage avec une section circulaire ($D=X$) ont le même diamètre hydraulique ($D_{eq}=X$), cela fait que leur vitesse moyenne calculée à partir de ces paramètres,

le débit et le diamètre hydraulique, est la même, et donc la pression due aux pertes de charges linéaires est la même.

CHAPITRE 2

CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET METHODOLOGIE D'ESSAI

1. INTRODUCTION

Dans cette partie on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

La caractérisation des matériaux de construction nécessite

- la connaissance de la nature de ses composants.
- la détermination des dosages optimaux

Ainsi que l'illustration des certaines interprétations ne pourraient possibles que si les différents constituent sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre

2. Simulation flow 3D :

Récemment, il y a un grand intérêt à étudier les caractéristiques d'écoulement des suspensions dans différentes applications environnementales et industrielles, telles que les avalanches des neiges, les coulées de débris, les systèmes de transport et les processus d'écoulement des matériaux. En ce qui concerne les aspects rhéologiques, la plupart des suspensions, comme le béton frais, se comportent comme un fluide non-Newtonien. Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé dans le monde. En raison de limites qui caractérisent le béton normal en termes de maniabilité et de capacité de remplissage de coffrage, il était nécessaire de développer une nouvelle classe de béton qui peut couler sous son propre poids, en particulier à travers les zones congestionnées du coffrage. Par conséquent, le béton autoplaçant (BAP) est un nouveau matériau de construction qui est de plus en plus utilisé dans les différentes applications. Étant donné sa fluidité élevée de BAP peut être utilisé dans certaines applications particulières, notamment dans la section densément renforcée. Cependant, la fluidité élevée rend le béton plus sensible à la ségrégation des gros granulats pendant l'écoulement (la ségrégation dynamique) et ensuite au repos (ségrégation statique). La ségrégation dynamique peut augmenter lorsque le BAP est coulé sur une longue distance ou en présence d'obstacles. Par conséquent, il est toujours nécessaire d'établir un compromis entre la fluidité, la capacité de passage, et la stabilité du BAP. Ceci doit être pris en considération afin de concevoir le processus de coulée et dosage des mélanges du BAP. Ceci est appelé la conception d'ouvrabilité du BAP. Une conception de maniabilité efficace et non coûteuse peut être achevée à travers la prévision et l'optimisation de l'ouvrabilité des mélanges de béton pour les procédés de construction sélectionnés, notamment le transport, le pompage, la mise en place, le compactage, la finition, etc. En effet, les formulations de mélange doivent se confirmer à la qualité de la construction demandée, par exemple les niveaux exigés de fluidité, la capacité de passage, la capacité de remplissage, et la stabilité (statique et dynamique). Celui est nécessaire pour développer des outils théoriques afin

d'évaluer dans quelles conditions les exigences de qualité de la construction sont satisfaites. Cette thèse est consacrée à la réalisation de simulations analytiques et numériques pour prédire la performance d'écoulement du BAP dans différents procédés de la mise en place du béton. L'objectif spécifique de cette étude consiste à simuler l'écoulement du BAP dans des essais empiriques, notamment la boîte en L et la boîte en T pour évaluer la performance du BAP pendant la mise en place (la fluidité, la capacité de passage, la capacité de remplissage, et la ségrégation dynamique induite par cisaillement ou par gravité). Par conséquent, le BAP est modélisé comme matériau hétérogène. En outre, un modèle analytique est proposé pour prédire la performance à l'écoulement du BAP.

Afin de réaliser la simulation numérique du flux de BAP, un logiciel CFD qui est appelé FLOW3D® est utilisé. Les flux de surface libre peuvent être modélisés avec le volume de fluide. FLOW3D® a tous les ingrédients recommandés pour le traitement réussi des surfaces libres. En outre, le logiciel intègre des améliorations majeures au-delà de la méthode originale de VOF pour augmenter la précision de conditions limites et le suivi des interfaces. Le programme augmente sa capacité en utilisant un maillage libre, la représentation du volume de la zone fractionnée (FAVOR), le volume amélioré de la technique des fluides (truVOF) et le système de maillage à blocs multiples.

FLOW3D® offre une multitude de capacités de maillage, telles que : lié, imbriqué, conforme, et/ou des maillages partiellement chevauchants, et des maillages d'éléments finis ajustés au corps, qui sont simple mais efficace et robuste dans la modélisation de flux complexes. L'utilisation de multiples blocs maillés permettent d'affiner localement les zones d'intérêt et de réduire considérablement les calculs temps requis pour une simulation donnée.

Récemment, on s'intéresse beaucoup à l'utilisation du logiciel FLOW3D® pour simuler divers problèmes de flux dans de nombreuses applications industrielles et de recherche, telles que l'aérospatiale, l'automobile, la biotechnologie, côtier et maritime, les procédés de revêtement, la fonte des métaux, l'énergie, les jets d'encre, la fabrication, micro fluides, hydraulique et hydrologie, et applications environnementales.

3. Présentation de logiciel :

FLOW-3D est un logiciel CFD (Computational Fluid dynamique) qui offre le plus haut niveau de précision. Il est développé par Flow Sciences et distribué partout dans le monde depuis 1985. Ses caractéristiques uniques font de *FLOW-3D* le meilleur instrument pour la

R&D, aussi bien au stade de la conception que pour améliorer tous les processus de production impliquant la dynamique des fluides.

FLOW-3D, contrairement à d'autres logiciels CFD commerciaux, a été entièrement développé pour être nativement transitoire et pour résoudre avec le plus haut niveau de précision les écoulements à surface libre : ces caractéristiques font de *FLOW-3D* un logiciel unique et absolument excellent. Ce logiciel est né au sein des laboratoires de Los Alamos des idées du Dr Hirt, l'inventeur de la méthode numérique VOF, le **meilleur algorithme pour la simulation de la surface libre des fluides**. Avec les années, le VOF traditionnel a évolué vers l'incomparable TruVOF, assurément le meilleur en terme de précision et de performances. *FLOW-3D* utilise un maillage cartésien, ce qui rend la **phase de configuration très courte, de l'ordre de quelques minutes**, ainsi que l'algorithme FAVOR pour le traitement de surface de l'objet, ce qui permet une résolution de la géométrie unique avec une efficacité de calcul incomparable.

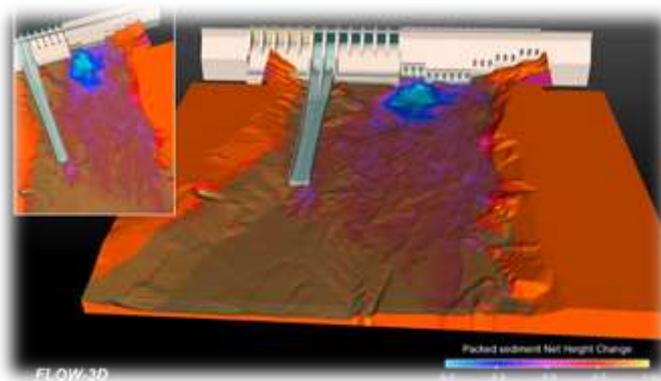


Figure 2-1 : FLOW 3D

4. Caractérisation et méthodologie d'essais :

Les matériaux utilisés sont locaux et naturels. Tous les bétons sont réalisés avec les mêmes matériaux :

- ✓ ciment de CPJ 42,5 Mpa de la cimenterie Biskra
- ✓ gravier 3/8 ; 8/15
- ✓ Sable OUED-SOUF
- ✓ Super plastifiant haut réducteur d'eau MEDAFLOW 30
- ✓ L'ajout : le calcaire

L'eau de robinet du laboratoire

5. MATERIAUX DE BASE UTILISES :

5.1 Ciment :

CHAPITRE 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Le ciment utilisé pour tous les bétons a été le ciment CEM II/B (CPJ 42.5). Ce ciment provient de la cimenterie de Biskra



Figure 2.2 : CEM II/B (CPJ 42.5)

Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont sur la fiche technique élaborée par le producteur au niveau d'un laboratoire spécialisé conformément à la norme Algérienne NA 442.

La composition élémentaire de ce ciment est présente dans les tableaux II.1

Tableau II- 1 : Les caractéristiques techniques de ciment

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES		
Analyses chimiques	Perte au feu (%)	10±2
	Teneur en sulfates SO ₃ %	2.5±0.5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
	Teneur en chlorure (%)	0.02-0.05
Composition minéralogique du clinker (Bogue)	C ₃ S(%)	60±3
	C ₃ A(%)	7.5±1
Temps de prise à 20° (NA 230)	Début de prise (min)	150±30
	Fin de prise (min)	230±50
Propriétés physiques	Consistance normale (%)	26.5±2
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) NA 231	3700-5200
	Retrait à 28 jours (µm/m)	<1000
	Expansion (mm)	3
Résistance à la compression	2 jours (MPa)	10
	28 jours (MPa)	42.5

5.2 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans cette étude est celle du robinet.

5.3 Adjuvant (superplastifiant) :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons, permet d'obtenir des bétons et mortiers de grande qualité en termes de résistance et de fluidité. En plus de sa fonction principale il diminue considérablement la teneur en eau du béton.

Le Superplastifiant utilisé se présente sous forme liquide (MEDAFLOW 30) compatible avec tous les types de ciment, provenant de la société Granitex



Figure 2.3 : Le super plastifiant MEDAFLOW 30

- **Dosage** : plage de dosage recommandée **0.5 à 0.2** du poids de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés

- **Mode d'emploi** : le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

5.4 LES GRANULATS :

5.4.1 Gravier :

- ❖ **Analyse granulométrique d'un sable et d'un gravier: [NF EN 933-1] [NF EN 9335]**

L'analyse granulométrique à trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions des grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le module de finesse (MF).

CHAPITRE 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Permet de distinguer les granulats suivant des classes granulaires qui sont commercialisées par les fabricants. L'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité, car la résistance et l'ouvrabilité du béton dépendent essentiellement du granulat. Par ailleurs, la dimension D du granulat se trouve limitée par différentes considérations concernant l'ouvrage à bétonner : épaisseur de la pièce, espacement des armatures, densité du ferrailage, complexité du coffrage, risque de ségrégation ...

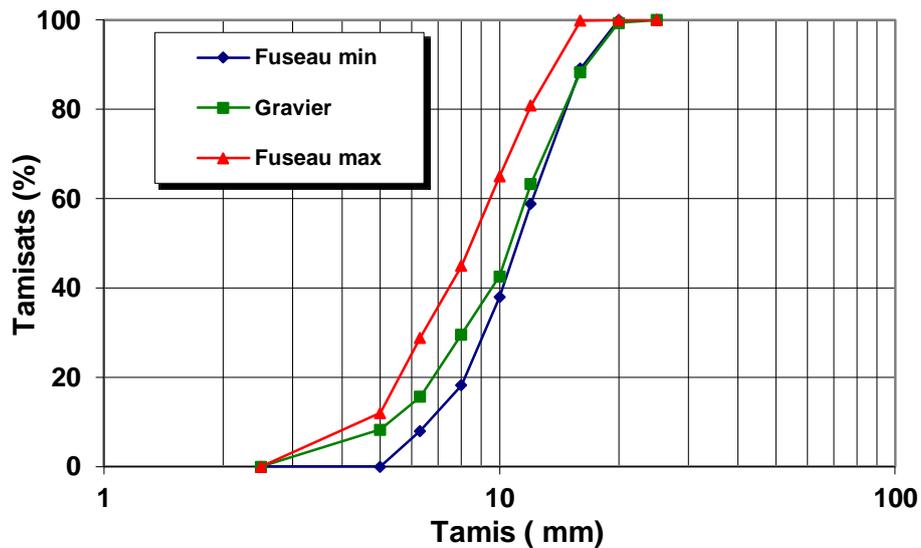


Figure 2.4 : Courbe granulométrique du gravier

Gravier 3/8

- La masse de l'échantillon $m = 1.6$ kg.

Tableau II-2 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis [mm]	Essai 1[g]	Essai 2[g]	Essai 3[g]	Moyenne[g]	Refus cumulé	Refus cumulé [%]	Tamisât [%]
8	0	0	0	0	0	0	100
6.3	124.5	163.5	132.39	140.13	140.13	8.75	91.25
5	392.5	466.5	416.39	425.13	565.26	35.32	64.68
4	530	554	494	526.56	1091.82	68.23	31.77
3.5	580	410	428.88	472.96	1564.78	97.79	2.21
2.5	36	27	13.89	25.63	1560.41	99.40	0.60
Fond	13.5	8	7.5	9.66	1600.07	100	0

Gravier 8/15

- La masse de l'échantillon $m=3.2\text{kg}$.

Tableau II-3 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

Tamis [mm]	Essai 1[g]	Essai 2[g]	Essai 3[g]	Moyenne[g]	Refus cumulé	Refus cumulé [%]	Tamisât [%]
16	19	22.5	11.09	17.53	17.53	0.54	99.46
12.5	951.5	878.5	1068.6	966.2	983.73	30.74	69.26
10	1114.5	1069	1125.08	1102.86	2086.59	65.20	34.8
8	955	974	848.58	925.86	3012.45	94.13	5.87
6.3	207.5	232.5	32.58	187.86	3200.31	100	0
5	0	0	0	0	3200.31	100	0
Fond	0	0	0	0	3200.31	100	0

5.4.2 Sable :

❖ Principe de l'essai :

Consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

L'échantillon de sable est préparé selon la norme **NF EN 933-1** La masse M de l'échantillon pour l'essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimée en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres



Figure 2.5 : sable

Tableau II-4 : Séries des tamis utilisés pour le tamisage du sable.

Fraction	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/3	[3,15 – 2,5 – 1,25 – 0,63 – 0,315 – 0,16 – 0,08]

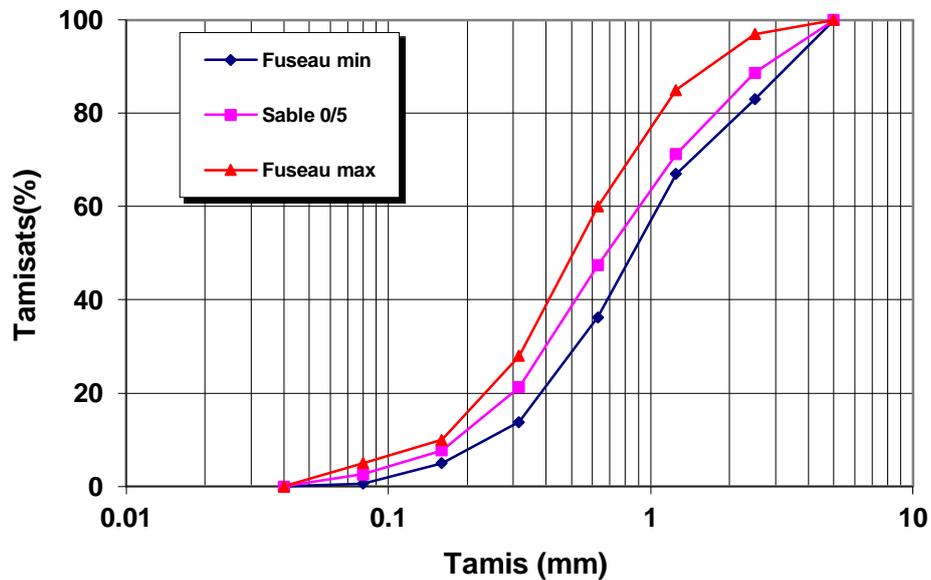


Figure 2-6 : Courbe granulométrique du sable

❖ **Module de finesse M_f :**

Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables .un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2.2 et 2.8 ; au-dessous, le sable a une

majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Tableau II-5 : Module de finesse du sable

Qualité du sable	Module de finesse
Fin	$1.8 < Mf < 2.2$
Moyen	$2.2 < Mf < 2.8$
Grossier	$2.8 < Mf < 3.2$
Rejeté	> 3.2

$$Mf = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis } \{ [0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 5] \})$$

$$Mf = \frac{0.466 + 4.232 + 23.765 + 71.131 + 95.664}{100} \quad (5)$$

Après l'analyse granulométrique, on trouve que le module de finesse du sable testé est égale à :

$Mf = 1.952$ Mf entre (1.8 et 2.2) donc c'est un sable **fin**.

❖ Equivalent de sable : [NF P18-598]

Dans le but d'évaluer la propreté de sable utilisé ; on effectue l'essai d'équivalent de sable en suivant la norme NF P 18-598. L'essai est effectué sur un sable, qui consiste à introduire une quantité défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation laissé décanter le mélange pendant 20 mn, ensuite mesurer les hauteurs. Ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H1 et du sédiment + flocculant H2).

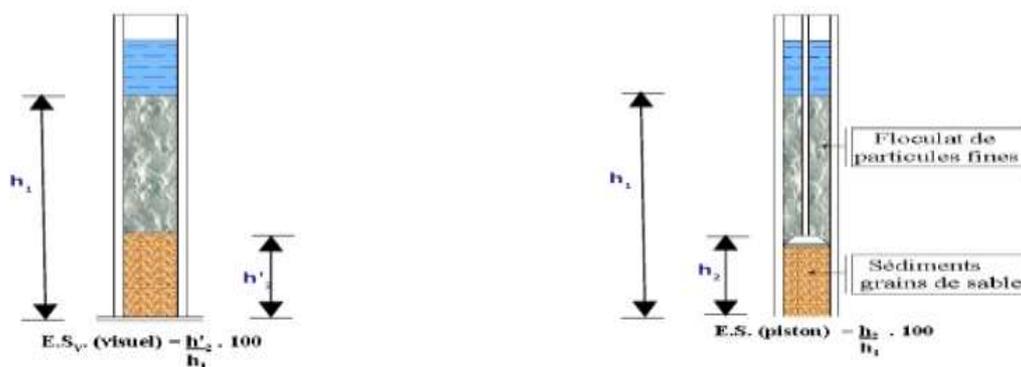


Figure 2-7 : Essai d'équivalent de sable

➤ **Equivalent de sable visuel (E.S.V) :**

- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesurer également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right) * 100 \quad (6)$$

Avec :

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h_2 : hauteur du sable.

➤ **Equivalent de sable piston (E.S.P) :**

Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, à cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.

$$E_{sp} = \left(\frac{h'_2}{h_1}\right) * 100 \quad (7)$$

Avec :

h_1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'_2 : hauteur du sable.

Les résultats obtenus sont représentés dans le **tableau (II-4)**

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'apprécier la qualité pour composer un béton:

Tableau II-6 : Les valeurs préconisées pour l'équivalent de sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. sable rejeté pour les bétons de qualité.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85%	ES ≥ 80%	Sable très propre l'absence presque totale de fines argileuses. Risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II-7 : caractéristiques physiques des granulats.

Propriétés mesurées	Normes	Sable		Gravier		observation
				3/8	8/15	
Masse volumique apparente (g /cm ³)	NA EN1097-6	1.696		1.356	1.333	/
Masse volumique absolue (g /cm ³)	NA EN1097-6	2.64		2.45	2.38	/
Equivalent de sable moy (%)	NF P18-598	Esv	Esp	/	/	
		82.77	79.95			
Coefficient d'absorption(%)	NA EN1097-6	2.77		0.84	1.4	Conforme
Indice des vides	/	0.556		0.80	0.78	
Porosité	/	35.75		44.65	43.99	
Compacité	/	64.24		55.35	55.01	

2.5.5. Additions minérales :

L'ajout utilisé dans notre programme expérimental est le suivant :

- ❖ Le calcaire : Substance minérale caractérisée par une composition chimique dans laquelle prédomine le carbonate de calcium (CaCO₃), souvent d'origine organique (calcaires à foraminifères dont la craie, calcaires coquilliers), mais aussi d'origine chimique (calcite, calcaire oolithique, pisolitique, lithographique). Les roches calcaires sont inégalement résistantes, plus ou moins perméables, et susceptibles d'être attaquées par dissolution si l'eau qui les baigne est riche en gaz carbonique.



Figure 2-8 : Le calcaire.

6. PROGRAMME EXPERIMENTAL

BAP soumis aux essais dans la présente étude est à base des matériaux locaux. Dans cette partie nous avons indiquée d'une façon principale la formulation utilisée pour le calcul le dosage d'un BAP, ainsi que la mise en œuvre et essais essentiels soit à l'état frais ou durci pour caractériser ce type de béton qui on a choisir.

La conception de bétons autoplaçants et tous les essais ont été réalisés au sein du laboratoire équipé au niveau de l'université de Mohamad el Bachir El-Ibrahimi.

7. Formulation de béton :

La méthode utilisée est la méthode française (LCPC), Certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Un rapport **G/S** proche pour favoriser la maniabilité du béton proche de **1** ;
- Un rapport **E/(C+F) = 0.4** ;
- Un dosage en ciment de **400 kg/m³**;
- Un pourcentage en ajouts (**SP, LHF, FS**) déterminé par tâtonnement.

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du ciment, on a fixé le dosage de ce dernier à 400 kg/m, ainsi le rapport E/L à 0,4 pour tous les bétons testés. Le rapport G/S est fixé à 0.9 et par la suite faire inclure séparément à ces bétons, deux pourcentages différents de la fumée de silice et laitier (5%, 10%).

Les résultats obtenus telle que la réponse mécanique ou encore l'étalement, par exemple, seront analysés par un plan d'expérience modèle design expert dans le but d'optimiser nos résultats.

7.1 Formulation du béton autoplaçant (BAP1) avec la super plastifiant:

Pour pouvoir comparer les performances des différents bétons indépendamment de l'action du **ciment** on a fixé le dosage de ce dernier à **400 kg/m³**, ainsi le rapport **E/L à 0,4** pour tous les bétons testés. Le rapport **G/S est fixé à 0.9** et par la suite faire inclure séparément à ces bétons, deux pourcentages différents de **CALCAIRE (5%, 10%)**. Le dosage en **super plastifiant** est **1.2%** de la masse ciment et filler (essai de mini-cône).

Tableau II-8 : Dosage de super-plastifiant.

Superplastifiant							
Densité (Gsup)	Teneur en solides (s) (%)	Msol c*d/100	=	Vliq Msol*100/s*Gsup	=	VE = Vliq*Gsup*100-s/100	Vsol = Vliq - VE
1,07	30	5,28		16,45		12,32	4,13

2.6.2 Optimisation de la composition du BAP

- Le volume de la pâte pour 1m³ du BAP égale à 400 kg/m³ du ciment ;
- 40 kg/m³ Ajout (calcaire) (10% du poids du ciment) ;
- E/(C+F)=0.4 ;
- G/S=0.9.

7.1.1 Détermination de la masse de chaque constituant :

On a:

- C=400 kg/m³;
- F=40 kg/m³ ;
- E/(C+F)=0,4 donc E=0,4*(400+40) **E= 176.L/m³**

➤ Correction d'eau

- E cor=E-ESP
- E cor=176-12.32 **E cor=163.68l/m³**

➤ Volume de pate

- V pates=C/ρc+F/Pf +Vsp+E+Vair
- V pate=400/3.28+40/2.26+16.45+163.68+50 **V pate=370 l**
- G+S+V pate=1000
- G+S=1000 -V pate
- G+S=630 ; G=630-SS=**299**
- G= 630-299 **G= 331 l/m³**

CHAPITRE 2 CARACTERISATION DES MATERIAUX

Tableau II-9 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC

Matériaux		Volume L/m ³		Teneur kg/m ³
Liant	Ciment	/		400
	fillers	/		40
EAU		176		163,68
Sable	S1	298,53	298,53	776,17
Granulats	G1	331,70	165,85	422,91
	G2		165,85	412,96
Superplastifiant		16,45		5,280
Air		50		

7.1.2 Confection du mélange :

Pour la confection des gâchés, nous avons utilisés plusieurs équipement et fournitures courants afin d'avoir un composant bien homogène (balance, récipient, spatules, truelles, huile de coffrage...), mais également des appareils de mesure tel que malaxeur, cône d'Abrams, rhéomètre, boîte en L...).

La préparation du BAP demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

7.1.3 Malaxage :

La préparation du BAP demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

- Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre cas elle est de 30 litre de volume.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant, les étapes qui se suivent sont:

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage ;
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve ;
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais ;

- L'utilisation d'un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 30 litres, le temps de malaxage suivant la norme NFP18-404 est de :

Un mélange à sec de ciment, granulats, filler pendant **120secondes**. Ensuite la solution de l'eau + super plastifiant, le tout malaxé encore pour **120s**.

- Laisser le mélange reposé.
- Effectuer immédiatement les essais après.
- Après avoir effectué tous les essais de caractérisations, on remplit les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.



Figure 2-9 : Malaxeur à béton

8. Essais de caractérisation des mélanges:

8.1 A l'état frais:

Etant donné que notre étude est réalisée sur des bétons autoplaçants, il est nécessaire de vérifier les propriétés rhéologiques. En plus, les BAP doivent être fluides avec une bonne mise en œuvre du matériau (vibration) et aussi doivent être stables (ne présentent pas de ségrégation). Après chaque préparation du mélange de BAP, des essais à l'état frais ont été effectués, à savoir la fluidité (test. D'étalement, boîte en L, Stabilisation au tamis) et la mise en œuvre. Et cela, pour voir l'effet des ajouts sur les propriétés à l'état frais des BAP étudiés



Figure 2-10 : L'ensemble des essais effectués sur le béton frais (essai de l'étalement, stabilité au tamis, boîte en L, rhéomètre)

8.2 Rhéomètre

Afin de caractériser la viscosité, la courbe d'écoulement et des grandeurs comme le seuil d'écoulement, il est possible d'avoir recours à l'usage de rhéomètres. Le rhéomètre ICAR est un instrument portable et robuste pour mesurer les propriétés d'écoulement fondamentales (rhéologiques) du béton frais. L'instrument a d'abord été développé au Centre international de recherche sur les agrégats (ICAR) situé à l'Université du Texas à Austin, puis par German Instruments pour répondre au besoin d'une méthode permettant de caractériser le véritable comportement d'écoulement des mélanges de béton. Les méthodes traditionnelles de mesure de l'affaissement ou de l'affaissement ne sont pas capables de caractériser les propriétés rhéologiques fondamentales du béton qui existent pendant les processus de mélange, de transport et de mise en place. En conséquence, la véritable performance des mélanges de béton innovants ne peut pas être mesurée avec ces méthodes traditionnelles basées sur l'affaissement.

le rhéomètre ICAR fournit, pour la première fois, un instrument peu coûteux et simple à utiliser qui peut être utilisé pour:

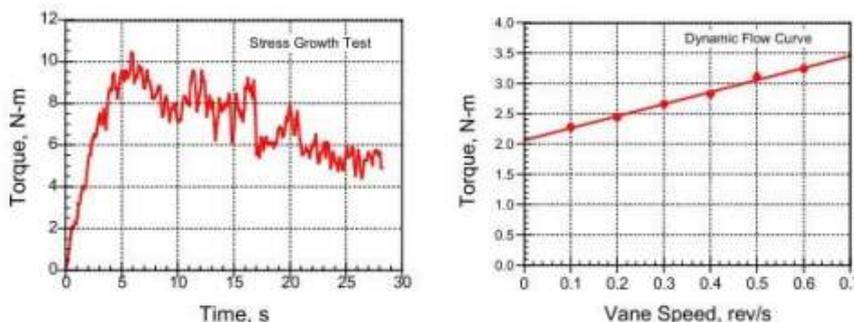
- ✓ Recherche et développement pour caractériser l'influence de nouveaux matériaux sur la rhéologie du béton.
- ✓ Optimiser les proportions du mélange afin que le béton résultant s'écoule facilement mais résiste à la ségrégation (particulièrement important pour le béton auto-consolidant).
- ✓ Contrôle qualité sur site.

8.3 Mode opératoire :

Le rhéomètre ICAR est composé d'un conteneur pour contenir le béton frais, une tête d'entraînement qui comprend un moteur électrique et un compteur de couple; une palette à quatre pales qui est tenue par le mandrin sur le conducteur; un cadre pour fixer l'ensemble conducteur / palette au sommet du conteneur; et un ordinateur portable pour faire fonctionner le pilote, enregistrer le couple pendant le test et calculer les paramètres de la courbe d'écoulement. Le conteneur contient une série de tiges verticales autour du périmètre pour éviter le glissement du béton le long de la paroi du conteneur pendant le test. La taille du conteneur et la longueur de l'arbre à aubes sont sélectionnées en fonction de la taille maximale nominale de l'agrégat. Le diamètre et la hauteur de l'aube sont tous deux de 127 mm

Deux types de tests sont effectués. Le premier type est un test de croissance de contrainte dans lequel la palette est tournée à une vitesse lente constante de 0,025 tr / s. L'augmentation initiale du couple est mesurée en fonction du temps. Le couple maximal mesuré lors de cet essai est utilisé pour calculer la limite d'élasticité statique. L'autre type d'essai est un essai de courbe d'écoulement pour déterminer la limite élastique dynamique et la viscosité plastique. Le test de la courbe de débit commence par une période de «claquage» au cours de laquelle la palette tourne à la vitesse maximale. Ceci est fait pour décomposer toute structure thixotrope qui peut exister et pour fournir un historique de cisaillement cohérent avant de mesurer les paramètres de Bingham. La vitesse de la palette est ensuite diminuée selon un nombre spécifié d'étapes, qui est sélectionné par l'utilisateur, mais au moins six étapes sont recommandées. Lors de chaque étape, la vitesse des 34 palettes est maintenue constante et la vitesse moyenne et le couple sont enregistrés. Le graphique du couple en fonction de la vitesse de rotation des palettes définit la courbe d'écoulement à partir de laquelle les paramètres de Bingham sont calculés.

Exemple de résultats



La figure à gauche montre les résultats d'un test de croissance de stress. Le programme utilise le couple de pointe et la géométrie d'essai pour calculer la limite d'élasticité statique, qui est affichée au bas de l'écran de l'ordinateur.

La figure de droite montre le couple moyen par rapport à la rotation moyenne des palettes mesurée pendant six étapes du test de la courbe de débit. Le logiciel calcule une ligne de meilleur ajustement aux données et signale l'intersection et la pente en tant que paramètres relatifs. Sur la base de la géométrie du test, le logiciel calcule les paramètres de Bingham : limite élastique dynamique et viscosité plastique.

CHAPITRE 3

Résultats et discussions

1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter et analyser les résultats obtenus des différents essais effectués (expérimentalement et ainsi par simulation) sur les bétons autoplaçant confectionnés

Les résultats concernant les propriétés des BAP à l'état frais (l'étalement, boîte en L), les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité plastique) et sont présentés dans des tableaux et sous forme de graphes.

Les

2. L'influence de temps de coulage sur l'étalement de BAP

Dans cette partie on a étudié l'évaluation de l'étalement (essai de cône d'Abrams pour le béton autoplaçant), la figure 3.1 résume les résultats obtenus ;

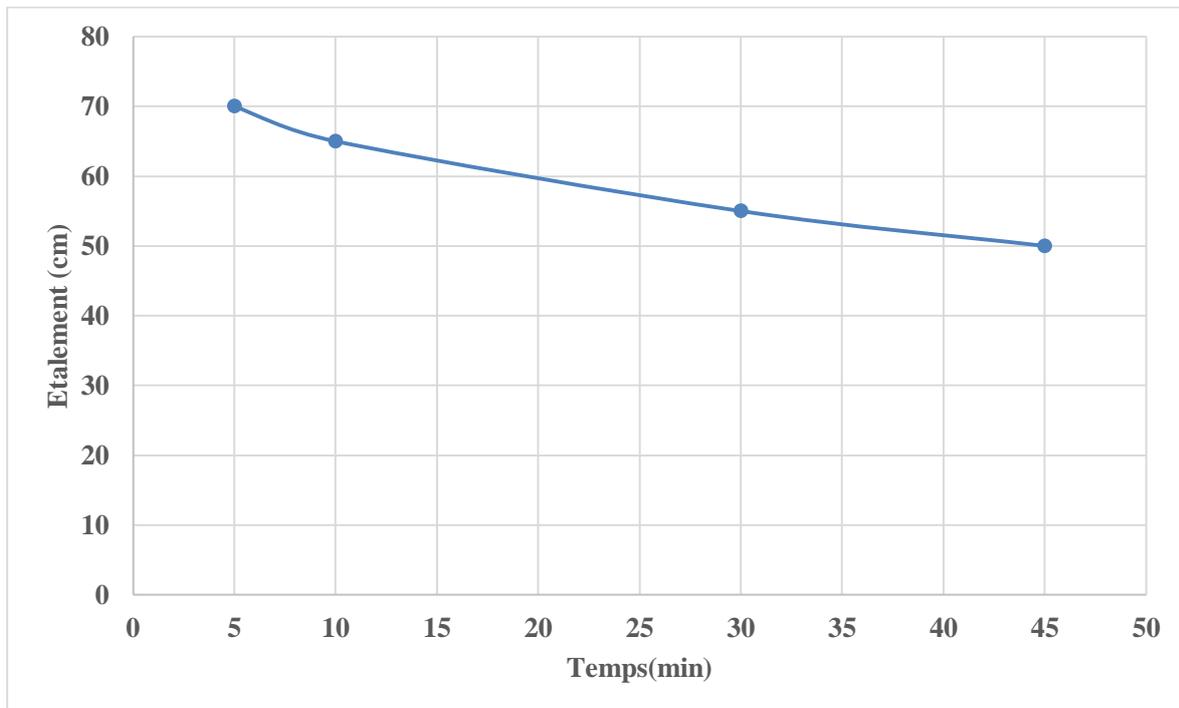


Figure 3.1 : Essai de cône d'Abrams pour le béton autoplaçant

Il est bien clair, d'après la figure 3.1, que l'étalement de BAP diminue avec le temps, ce qui peut être expliqué par le phénomène de prise ainsi que l'augmentation de volume des granulats enveloppée par la pâte de ciment.

2.1 L'influence de temps de coulage sur le Seuil de cisaillement τ_0 de BAP ;

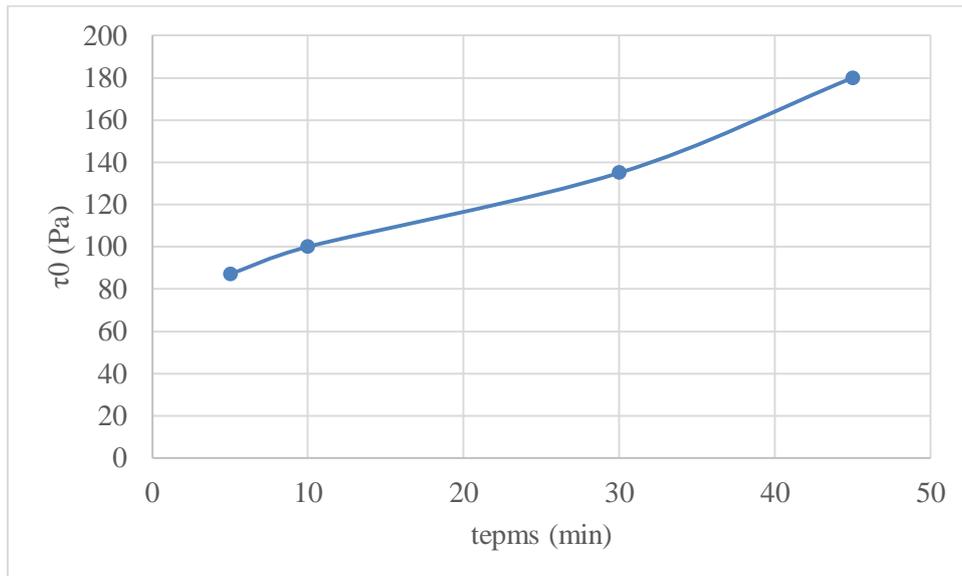


Figure 3.2 : le développement de Seuil de cisaillement avec le temps

D'après la figure 3.2 on peut voir clairement que le seuil de cisaillement augmente proportionnellement avec le temps, cette augmentation est expliquée par l'augmentation des efforts de frottement entre les particules de ciment après les premières réactions d'hydratation.

2.2 L'influence de temps de coulage sur la viscosité de BAP ;

La figure 3.3 présente l'évolution de viscosité en fonction de temps ; on peut remarquer que la viscosité diminue légèrement avec le temps.

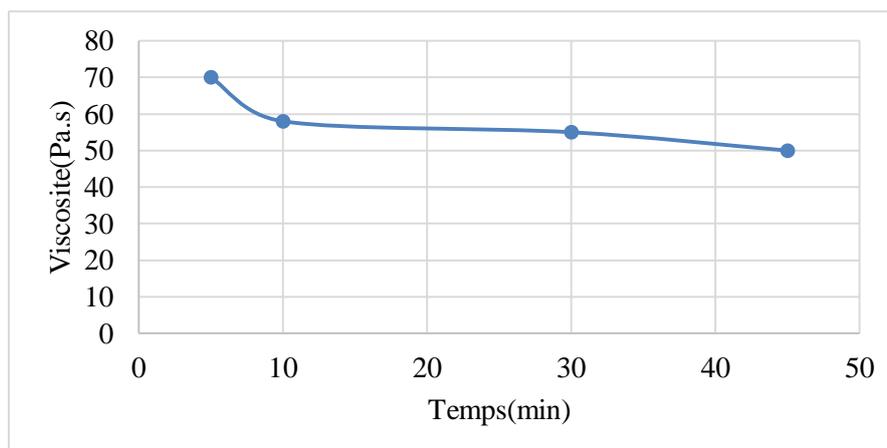


Figure 3.3 : l'évolution de viscosité en fonction de temps

2.3 Corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité

La figure 3.4 présente la corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement

Une relation polynomiale de degré 2 régit cette corrélation avec un coefficient $R^2=0.86$

L'équation polynomiale de l'ordre 2 présentée dans l'équation suivante :

$$Y = 0.0026x^2 - 0.8825x + 124.24.$$

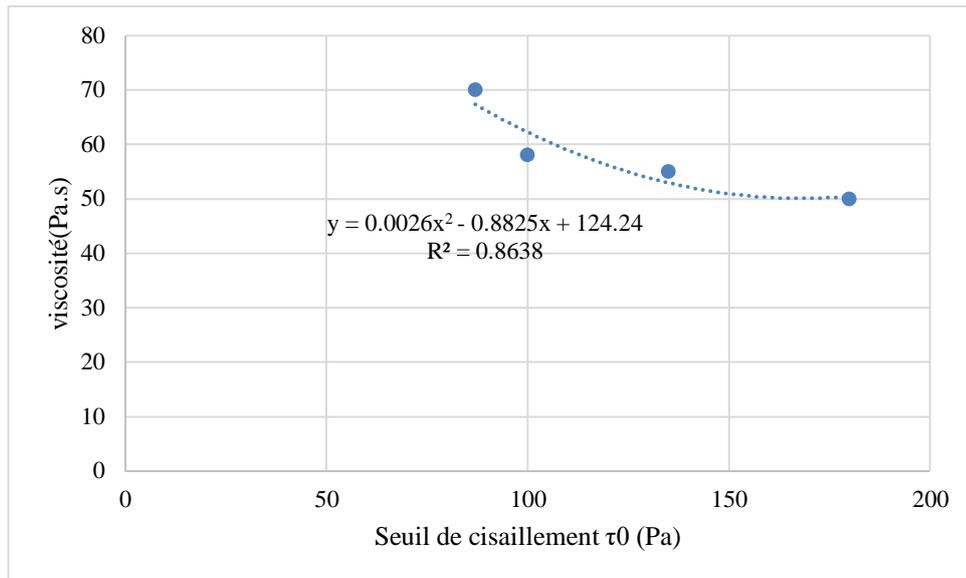


figure 3.4 : corrélation entre la viscosité et le seuil de cisaillement

2.4 L'influence de temps de coulage sur la viscosité de BAP :

D'après la figure 3.4 qui présente le développement de temps d'écoulement dans la boîte L en fonction de temps on peut remarquer une grande augmentation de temps d'écoulement en fonction de temps de coulage. Cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation du seuil de cisaillement et la diminution de viscosité des BAP.

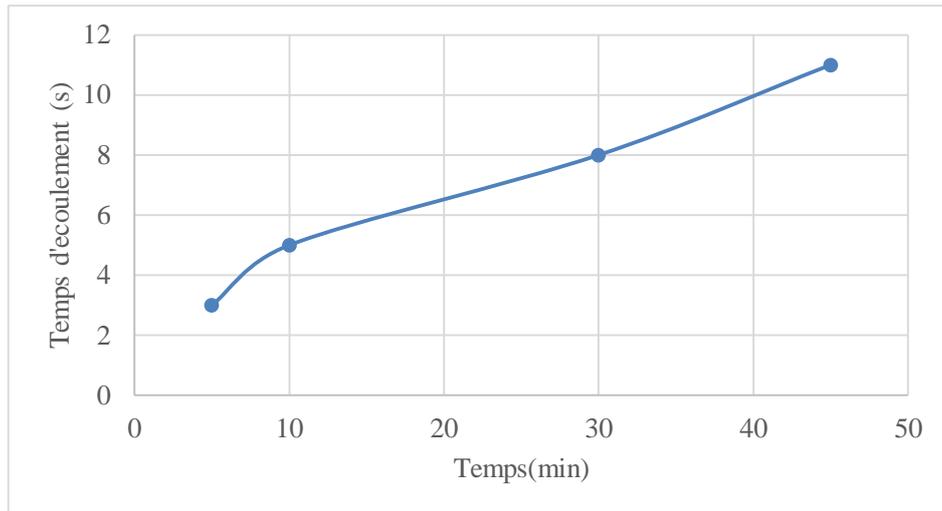


figure 3.5 : l'évolution de temps d'écoulement en fonction de temps .

2.5 L'influence de temps de coulage sur la L1/L2 boîte en Lde BAP :

La figure 3.5 présente l'évolution de L1/L2 en fonction de temps ; on peut remarquer que le rapport L1/L2 diminue avec le temps

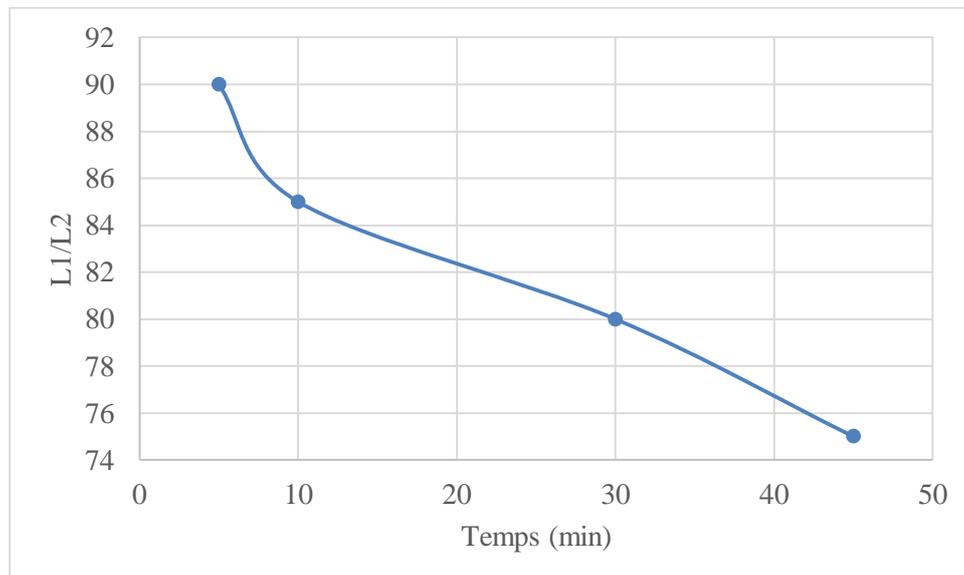


figure 3.6 : l'évolution de L1/L2 en fonction de temps

Etape 3 : choix des conditions aux limites

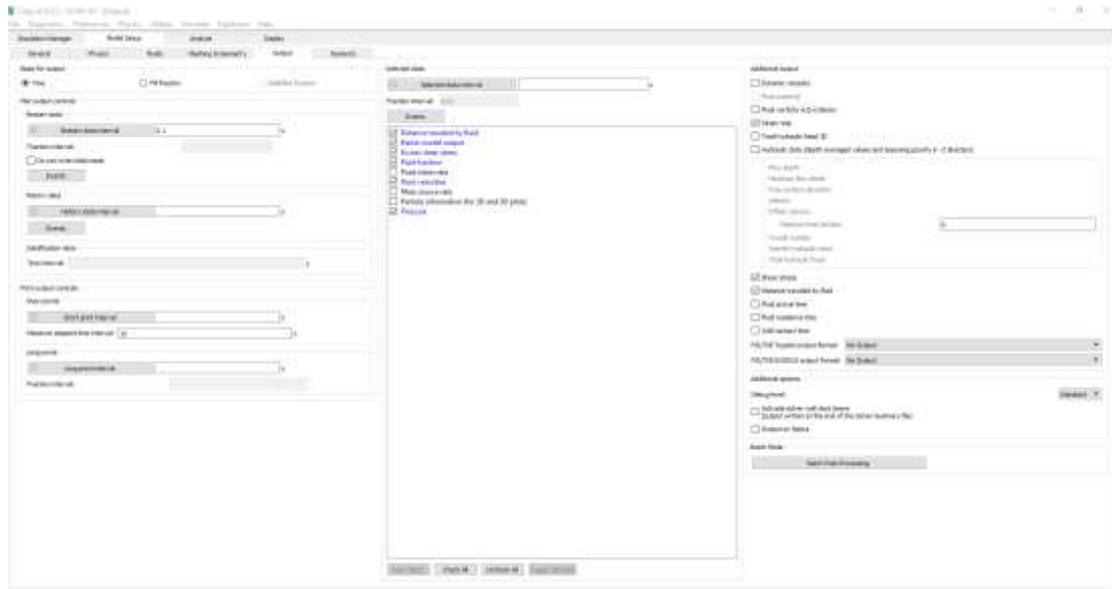


Figure 3.9 : choix des conditions aux limites

Etape 4 : Trasage de boîte en L :

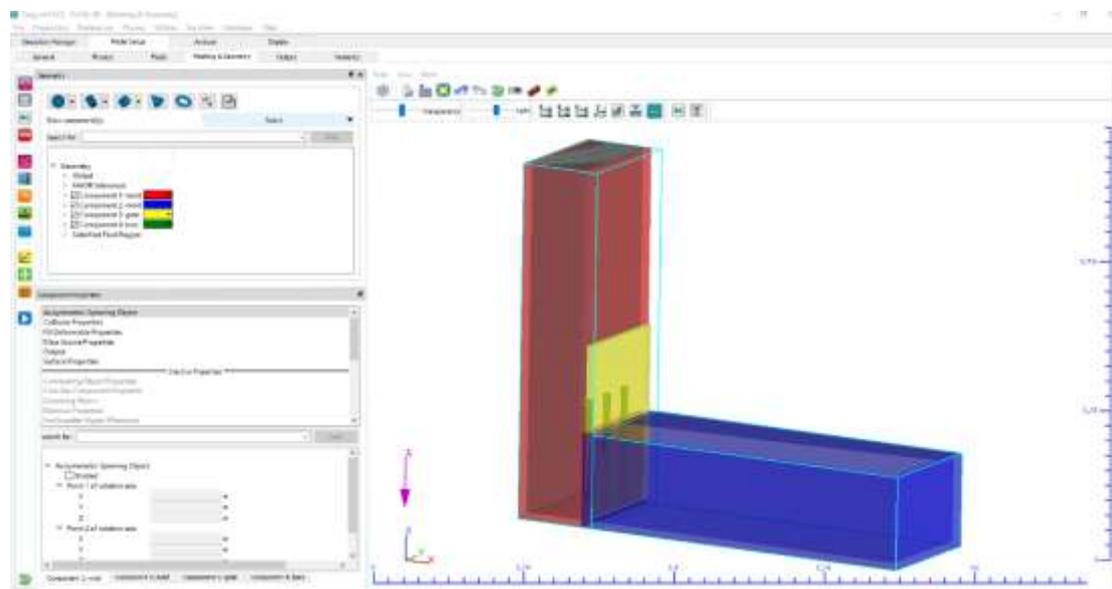


figure 3.10 : Trasage de boîte en L

Etape 5 : ajouter maillage:

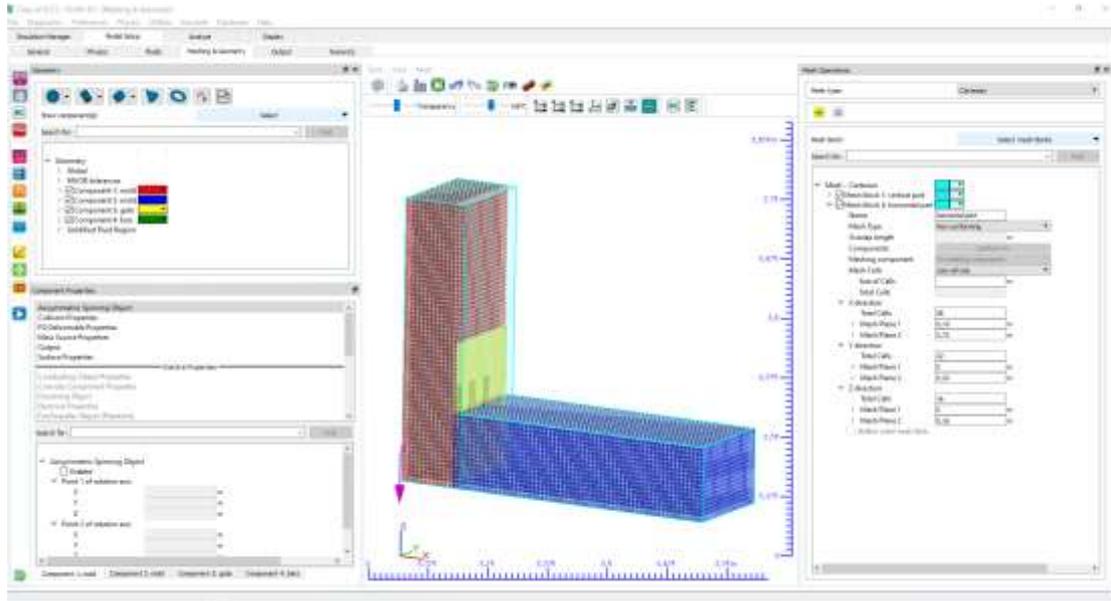


figure 3.11 : ajouter maillage en

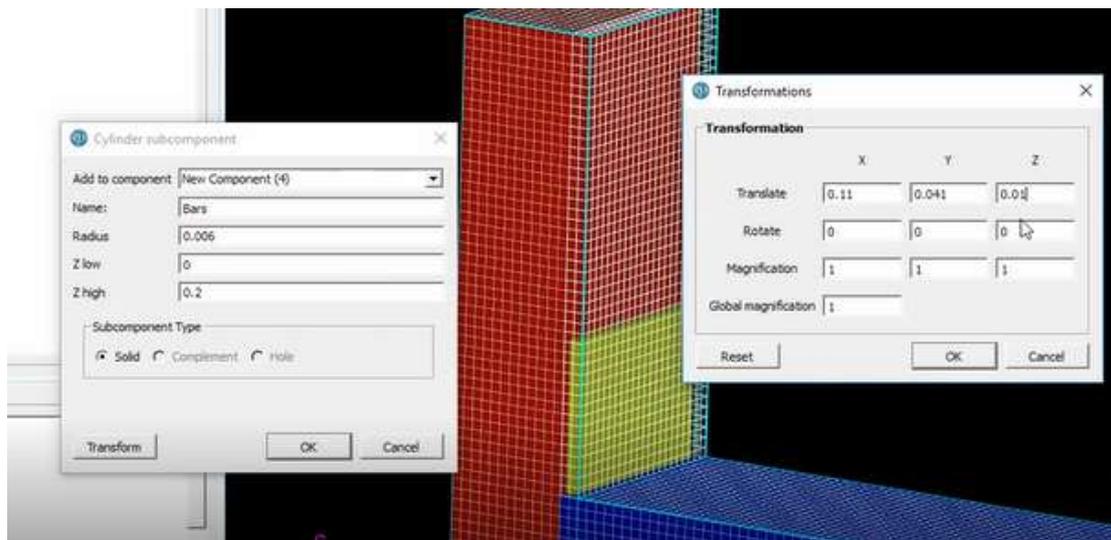


figure 3.12 : ajouter maillage

4. Les résultats de modélisation :

4.1 avant l'ouverture de la trape

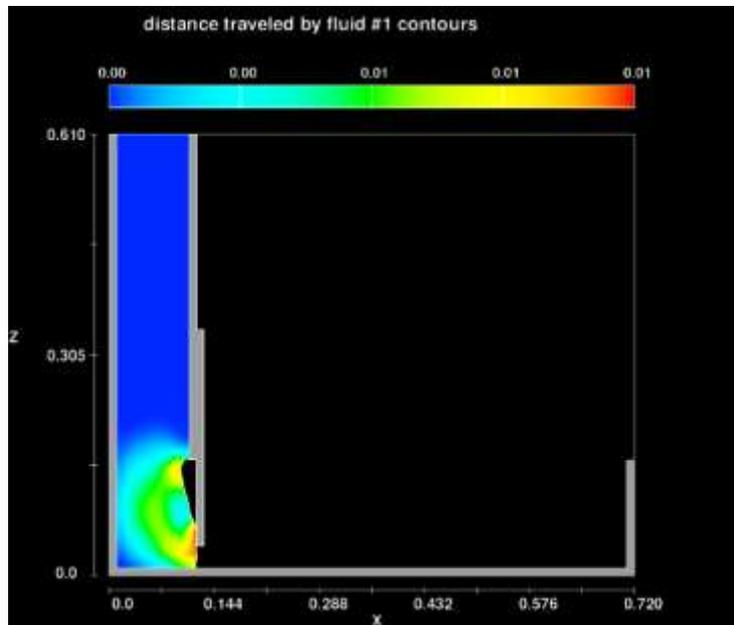


figure 3.13 : avant l'ouverture de la trape

4.2 après 1 seconde de l'ouverture de la trape

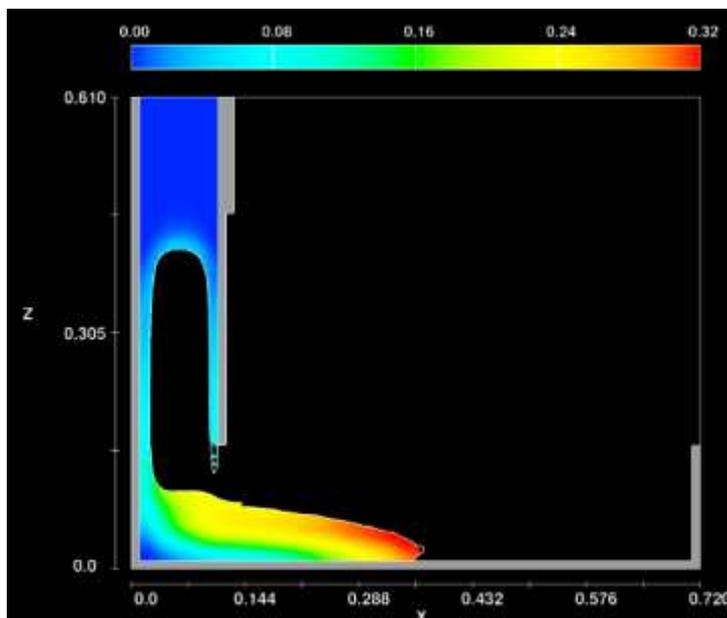


figure 3.14 : après 1 seconde de l'ouverture de la trape

4.3 après 4 seconde de l'ouverture de la trape

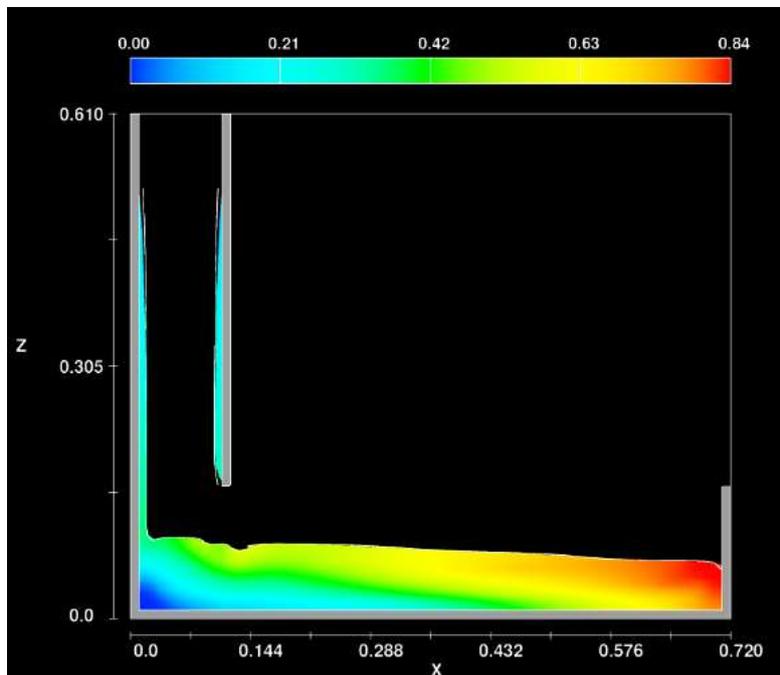
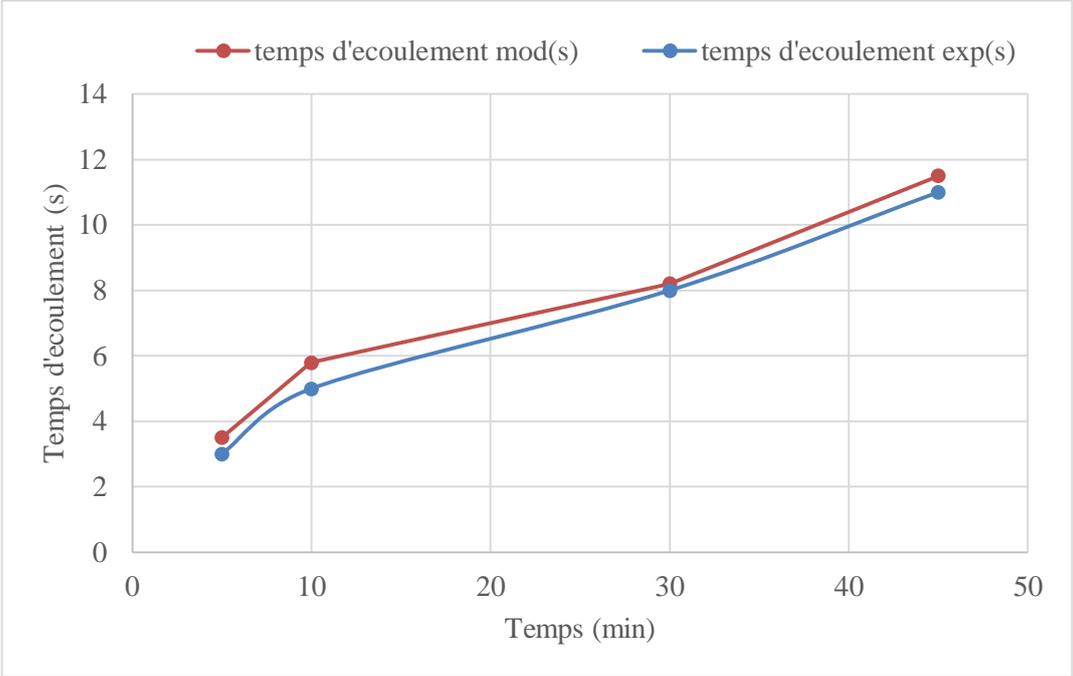


figure 3.15 : après 4 seconde de l'ouverture de la trape

5. Relation entre les resultats experementale et de la modélisation :

D'après la figure 3.4 Qui presente la relation entre le temps d'écoulement mesuré expérimentalement et celle calculer par modilisation on peut voire une harmonisation entre les deux courbe que ce valide la modelisation numerique.



Conclusion générale

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux dont les qualités méritent d'être valorisées. En raison de leurs propriétés rhéologiques très spécifiques, leur compréhension nécessite des investigations plus approfondies.

Cette étude se base principalement sur l'analyse des performances d'écoulement du béton autoplaçant (BAP) dans les essais de maniabilité et sur les sections structurales en utilisant des méthodes analytiques et numériques. La performance d'écoulement des mélanges du BAP étudiés ont été analysés en tant que matériaux homogènes. L'effet des paramètres rhéologiques d'un béton se reflètent d'une manière directe sur son utilisation : malaxage, pompage, mise en place... Pour évaluer ces paramètres, des essais simples et pratiques in situ ; mais empiriques ont été introduits dans la caractérisation des bétons comme le cône d'Abrams, la boîte en L etc.

Les propriétés de stabilité dynamique du BAP ont été évalués à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides numérique (MFN) nommé FLOW3D®. D'après les résultats de chaque phase de l'étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- La performance d'écoulement du BAP a été modélisée dans l'essai de Boîte en L, analytiquement et numériquement considérant le BAP comme un fluide unique et homogène.
- Le modèle de Herschel-Bulkley fournit des meilleurs coefficients d'estimation que le modèle Bingham.
- Les simulations peuvent qualitativement prédire l'effet des paramètres rhéologiques et la masse volumique de la partie fluide de suspension sur la performance d'écoulement du BAP dans l'essai de Boîte en L.
- Les résultats numériques ont montré que l'augmentation de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement peuvent diminuer la fluidité, la capacité de passage, et la stabilité dynamique de la suspension de béton.
- Une harmonisation entre les deux courbes que ce valide la modélisation numérique a été observé

Liste des références :

- OKAMURA H.ET AL**, "Self-compacting high performance concrete, Proceeding of the fifth sec", Vol.3, pp.2381-2388, 1995.
- J.DESNYTER, J-C.BRAQUENIER**, "Le béton autoplaçant ou autocompactant, un béton en pelin essor", Bruxelles, CSTC-Magazine, automne 2000.
- Carlo DE PAUW** , "CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION recherche, CSTC", Rapport d'activités, Centre de Béton et ouvrages en béton, rapport d'activités. P.10, 2004.
- T.SEDRAN**, "Les bétons autonivelants (BAN) synthè bibliographique", Bulletin de liaison LCPC. N°196, mars 1995.
- Khayat K.**, "Les bétons auto nivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation", p 479-483, Eyrolles, 1997.
- Ben Akili Sarah**, "caractérisation expérimental des bétons autoplaçant obtenus par ajout des déchets de construction", thèse de Magister université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- ZAIDI Hadj SAADOUNE Lotfi** « Caractérisation mécanique d'un béton auto plaçant à partir d'un essai d'indentation » Mémoire de Master UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ
- NASRI.S**, "Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et Essai direct d'un béton autoplaçant (BAP) à base de matériaux locaux (effet de la nature du sable)", Mémoire de Magister. Université de Mohamed Boudiaf-M'sila , 2016.
- Sheinn, A.M.M**, " Rheological modelling of self-compacting concrete ", Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007.
- J.F. Agassant, P. Avenas, J.-P. Sergent, B. Vergnes, M. Vincent**, "La mise en forme des matieres plastiques", Technique et Documentation, Lavoisier (1996)
- P. Coussot, J.L. Grossiort, eds**, "Comprendre la rhéologie", EDP Sciences (2001)
- G. Couarraze, J.L. Grossiord**, "Initiation `a la rhéologie", Technique et documentation, Lavoisier, 3`eme ´edition (2000)
- P. Ostwald**, "Rhéophysique: Ou comment coule la matiere", Belin (2005)
- R.B. Bird, R.C. Armstrong, and O. Hassager**, "Dynamics of Polymeric Liquids. Vol. 1: Fluid Dynamics", Wiley, NewYork, 2nd ´edition (1987)
- R.B. Bird, C.F. Curtiss, R.C. Armstrong, and O. Hassager**, "Dynamics of Polymeric Liquids. Vol.2: Kinetic Theory", Wiley, New York, 2`eme ´edition (1987)
- P.J. Carreau, D.C.R. de Kee, R.P. Chhabra**, "Rheology of polymeric systems. Principles and applications", Hanser Pub-lishers (1997)

- R.G. Larson**, "The structure and rheology of complex fluids", Oxford University Press, New-York (1999)
- C.W. Macosko**, "Rheology : principles, measurements and applications", Wiley-CH, New-York (1994)
- N. Phan-Thien**, "Viscoelasticity", Springer (2002)
- R.I. Tanner**, "Engineering Rheology", Clarendon Press, Oxford (1985)
- G. Fuller**, "Optical rheometry of complex fluids", Oxford University Press (1996)
- H. Janeschitz-Kriegl**, "Polymer melt rheology and birefringence", Springer-Verlag, New-York (1983)
- Tattersall, G. H. and Banfill, P. G. F.** (1983) 'The Rheology of Fresh Concrete', Pitman, London
- Flatt, R. J.** (2004b) Towards a prediction of superplasticized concrete rheology', Materials and Structures, 37(5), pp. 289–300.
- Perrot, A., Rangeard, D., Amziane, S., & Sonebi, M.** (2019). Défis à relever en termes de rhéologie des matériaux cimentaires pour une impression 3D par extrusion/dépôt. Academic Journal of Civil Engineering, 36(1), 175-179. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.43>
- Mati Raouf Ouzaid Youcef** « Caractéristique mécanique et rhéologique du mortier cimentaire imprimé en 3D » Mémoire de Master UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRERIDJ
- Hameed,R.,&Papon,A.**(2019). Etude numérique du comportement d'un élément en béton Consulté à l'adresse <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-02119257>