

 <p>جامعة عبد الملك السعدي Université Abdelmalek Essaâdi</p> <p>Université Abdelmalek Essaâdi</p> <p>Faculté des Sciences et Techniques Tanger</p> <p>Laboratoire de Mécanique et Génie Civil</p>	 <p>Aix-Marseille université</p> <p>Aix Marseille Université</p> <p>Ecole doctorale 353</p> <p>Département Génie Civil, laboratoire IUSTI, UMR-CNRS 7343, Polytech' Marseille</p>
---	--

THÈSE de DOCTORAT en cotutelle pour l'obtention du

Doctorat de l'université d'Aix-Marseille (France)

Et du

Doctorat en Sciences et Techniques de l'Ingénieur (Maroc)

Discipline : Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Génie Civil

Par

BENAICHA Mouhcine

**Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en
additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au
jeune âge et la durabilité des bétons**

Soutenue le 25 Novembre 2013 devant le Jury

Pr. Mohammed ADDOU	FST - Université Abdelmalek ESSAÂDI (Maroc)	Président
Pr. Sofiane AMZIANE	Université Blaise Pascal, Polytech' Clermont-Ferrand (France)	Rapporteur
Pr. Lahcen BAH	Ecole Mohammadia d'Ingénieurs - Université Mohammed V-Agdal	Rapporteur
Pr. Abdeslam DRAOUI	FST - Université Abdelmalek ESSAÂDI (Maroc)	Rapporteur
Pr. Yves BURTSHELL	Aix-Marseille Université, Polytech' Marseille (France)	Co-Directeur
Pr. Adil HAFIDI ALAOU	FST - Université Abdelmalek ESSAÂDI (Maroc)	Co-Directeur

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Pr. Sofiane AMZIANE, Pr. Lahcen BAHY et Pr. Abdeslam DRAOUI qui ont accepté la lourde tâche d'être rapporteurs de ce mémoire. Je souhaite remercier Pr. Mohammed ADDOU de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je remercie Pr. Philippe BOURNOT d'avoir veillé à faire réussir le contrat de cotutelle entre les deux universités, de m'avoir apporté toutes les aides nécessaires et suffisantes pour effectuer ce travail dans des bonnes conditions.

Bien entendu, la palme des remerciements va à Professeur Yves BURTSHELL qui, plus qu'un co-directeur de thèse, fut un réel soutien durant ces trois années de travail en commun. Merci de m'avoir donné l'opportunité de découvrir le monde de la recherche et d'avoir supervisé mon cheminement.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon co-directeur Professeur Adil HAFIDI ALAOUI pour son soutien et ses conseils professionnels et personnels prodigués pendant ces années de thèse et aussi pendant mes études universitaires. Merci infiniment pour votre confiance et pour votre aide précieuse et merci aussi de m'avoir donné l'opportunité de découvrir le monde de la recherche.

Une thèse ne se bâtit pas seule, de nombreuses personnes ont participé à ce travail. Ils ne seront jamais assez remerciés pour leur soutien actif. Je souhaite par conséquent présenter ma gratitude à Monsieur Xavier ROGUIEZ et Monsieur Nicolas FAVRIE et en particulier mon encadrant Monsieur **Olivier JALBAUD**, pour son soutien, ses remarques constructives et, tout simplement pour sa gentillesse. Il n'a jamais cessé d'apporter son aide.

Au sein de Polytech' Marseille, je tiens à remercier Monsieur Lounes TADRIST, Monsieur Christophe Muller, Monsieur Philippe DUMAS et toute l'équipe administrative et en particulier Monsieur Pascal CAMPION pour sa gentillesse. Je remercie également Madame Gwenaëlle CUENCA, Monsieur Jean Baptiste PAPA et Monsieur Franck *DUTERTRE* ainsi que toute l'équipe technique pour leur aide au quotidien.

Ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide de différents financeurs qui, au travers de leur soutien matériel, ont reconnu mon travail et m'ont fait confiance : Ciments CALCIA (M. Claude VALENTIN), Bronzo Perasso (M. Stéphane MARTIN), Société Carmeuse et Société Sika France.

Je ne saurais oublier de remercier toutes les personnes qui me sont chères, en particulier mes parents, mes sœurs et mes frères pour le soutien et l'amour qu'ils m'ont apportés dès ma tendre enfance. Enfin, Docteur Aicha BELCAID, ma femme, merci pour m'avoir choisi et aimé, merci pour ton encouragement et ton soutien inlassable.

RÉSUMÉ

L'industrie du béton est une source importante d'émissions de gaz CO₂ lors de la production de ciment. Une des solutions proposées à l'industrie de la construction est de remplacer le ciment par des matières premières secondaires moins polluantes (ex : filler calcaire, fumée de silice), qui peuvent également améliorer les caractéristiques rhéologiques du liant et accroître la durabilité du béton.

Ainsi, le développement des bétons autoplaçants peut être envisagé comme une tentative de réduire l'impact environnemental de la construction. De même, l'optimisation des structures vise également à réduire les quantités (en volume) de béton et se traduit alors par le recours aux bétons à hautes performances et aux bétons fibrés à ultra performance (BHP et BFUP).

Le but principal de cette thèse est donc de : (1) standardiser la formulation de béton issue des différents travaux de recherche publiés tout en assurant une bonne compréhension de ses propriétés rhéologiques; (2) adapter ces principes aux conditions de réalisation (prise en compte des caractéristiques des matériaux locaux utilisés); et (3) vérifier dans le laboratoire ou sur le terrain la viscosité plastique et le seuil d'écoulement des bétons.

Outre les moyens expérimentaux classiques tel que le V-funnel, l'étalement, la stabilité au tamis et la boîte en L, nous avons utilisé, dans notre étude, un autre moyen de caractérisation rhéologique : c'est l'écoulement de béton dans un V-Funnel couplé à un canal horizontal en plexiglas. Dans un premier temps nous essayons de voir l'influence de la composition du mélange tel que le rapport Eau/Ciment, les additions minérales (filler calcaire, fumée de silice) et les superplastifiants sur sa viscosité et puis, nous cherchons à comprendre la corrélation entre la viscosité et les paramètres rhéologiques de béton en se basant sur des modèles proposés dans la littérature. À partir de là, nous cherchons à présenter le modèle qui décrit le comportement de béton. Pour ce faire, nous proposons une corrélation théorique entre la viscosité plastique du béton frais et le temps d'écoulement dans le V-Funnel, puis nous comparons cette solution théorique avec des mesures expérimentales rapportées dans la littérature.

Enfin, l'étude de la remontée d'eau sur une surface verticale, le contrôle de la propagation d'ondes dans le béton frais et la maturométrie permettront une meilleure compréhension de leur comportement rhéologique et mécanique.

ABSTRACT

The concrete industry is an important source of carbon dioxide gas emissions during cement production. One of the proposed solutions to the construction industry is to replace the cement by less polluting secondary raw materials (e.g. limestone filler, silica fume), which can also improve the rheological properties of binder and increase the concrete durability.

Thus, the development of self-compacting concrete can be seen as an attempt to reduce the environmental impact of the construction. Similarly, the structure optimization also aims at reducing the quantity (in volume) of concrete and is reflected in the use of high performance concrete and ultra performance fiber-reinforced concrete (HPC and UPFRC).

The emergence of these new concretes increases the need to reliably characterize the casting behaviour of the concrete. The most widely adopted approach to quantify these rheological properties is to experimentally measure the shear stress versus strain rate using a concrete rheometer.

In addition to traditional experimental tests such as the V-funnel, spread, sieve stability and L box, in our study we used another test of rheological characterization: it is the flow of concrete in a V-Funnel and then in a horizontal channel Plexiglas.

The main purpose of this thesis is to: (1) standardize the concrete formulation outcome of various research works published while ensuring a good understanding of its rheological properties, (2) adapt these principles to the realization conditions (taking into account characteristics of local materials used), and (3) check, in the laboratory or in the field, the plastic viscosity and the flow threshold of concrete.

The study of wave propagation in the fresh concrete and the measurement of the developing strength of maturing concrete will allow a better understanding of their rheological and mechanical behaviour.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	9
Axe 1: ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre 1 : ETAT DES CONNAISSANCES ET PRATIQUE ACTUELLE DES BETONS.....	15
I. Généralités sur le béton	15
II. Matériaux et leurs rôles	16
II.1 Granulats	16
II.2 Ciment.....	17
II.3 Ajouts minéraux.....	18
II.4 Adjuvants.....	21
II.5 Fibres	24
III. Famille de bétons	27
III.1 Bétons à hautes performances « BHP »	28
III.2 Bétons fibrés à ultra performance « BFUP »	32
III.3 Bétons Autoplaçants « BAP »	35
IV. Formulation de différents bétons	36
IV.1 Formulation des Bétons à hautes performances.....	37
IV.2 Formulation des bétons fibrés à ultra performance	38
IV.3 Formulation des bétons autoplaçants	41
IV.4 Discussion et comparaison entre les différentes formulations	46
Chapitre 2 : RHEOLOGIE ET RHEOMETRES	48
I. Définitions	48
I.1 Fluides visqueux.....	48
I.2 Vitesse de cisaillement.....	49
I.3 Comportement de différents liquides	49
II. Caractérisation des bétons à l'état frais.....	55
II.1. Caractérisation empirique : fluidité & viscosité	56
II.2 Capacité de remplissage	60
II.3 Ségrégation statique.....	64
II.3 Teneur en air occlus	67
III. Rhéomètres.....	68

IV.	Corrélation entre grandeurs spécifiques expérimentales (τ_0 , μ) et caractéristiques rhéologiques des bétons.....	76
Chapitre 3 : Caractérisation mécanique des bétons		79
I.	Essais destructifs	79
I.1	Essai de compression	79
I.2	Essai de traction par fendage	81
I.3	Résistance à la flexion	81
I.4	Mesure du module d'élasticité.....	83
I.5	Coefficient de Poisson.....	84
II.	Processus de fissuration des bétons	86
II.1	Fissuration gouvernée par des contraintes de compression	86
II.2	Fissuration gouvernée par des contraintes de traction.....	87
II.3	Fissuration gouvernée par des contraintes de flexion.....	87
III.	Essais non destructifs	88
III.1	Maturométrie	89
 Axe 2: NOUVELLES APPROCHES POUR FORMULER ET ANALYSER À L'ÉTAT FRAIS LES BÉTONS		
I.	Matériaux utilisés	96
I.1	Ciments.....	96
I.2	Fillers calcaires.....	97
I.3	Fumée de silice	97
I.4	Granulats.....	97
I.5	Superplastifiants.....	98
I.6	Fibres	99
II.	Influence des additions sur l'écoulement de mélange.....	100
II.1	Effet du dosage de superplastifiant.....	102
II.2	Effet du rapport E/C.....	103
II.3	Effet des ajouts minéraux	104
III.	Méthode adoptée pour la formulation des BAP	106
III.1	Quantité de ciment - prise en compte de l'agressivité du milieu	107
III.2	Estimation de la résistance cible	108
III.3	Additions minérales	109
III.4	Dosage des granulats	110
III.5	Dosage en superplastifiant.....	110

III.6	Prise en compte de l'eau apportée ou retenue par les matériaux et produits.....	111
III.7	Conclusion : Démarche proposée pour la formulation des BAP	112
III.8	Application : Région d'Aix-Marseille.....	113
IV.	Procédure de fabrication	117
V.	Caractérisation d'écoulement des bétons : Nouvelle approche.....	119
V.1	Calcul théorique de vitesse d'écoulement dans le V-Funnel.....	121
V.2	Calcul théorique de la viscosité plastique dans un canal horizontal	130
VI.	Etude de la remontée d'eau sur une surface verticale	141
VI.1	Procédure expérimentale	143
VII.	Auscultation sonique du béton frais.....	151

Axe 3: EXPLOITATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

I.	Analyse des bétons autoplaçants.....	159
I.1	Méthodes expérimentales.....	160
II.	Analyse des bétons autoplaçants fibrés BAPF	167
II.1	Composition et caractérisation des BAPF	168
III.	Analyse des bétons à haute performance BHP	177
III.1	Caractérisation rhéologique des BHP	178
III.2	Caractéristiques mécaniques des BHP à l'état durci	183
IV.	Bétons fibrés à hautes performances	184
IV.1	Caractérisation rhéologique des BHPF.....	185
IV.2	Performances mécaniques des BHPF	187
V.	Maturométrie.....	191
V.1	Influence de la température	194
V.2	Détermination de l'énergie d'activation E_a	197
V.3	Exemple de calcul de l'âge équivalent sur la base d'un suivi thermique.....	201
	Conclusion générale	205
	Perspectives.....	208
	REFERENCES.....	209
	ANNEXES.....	228

INTRODUCTION GENERALE

La famille des bétons s'enrichit régulièrement depuis quelques années avec des bétons aux nouvelles performances, tels que les bétons à hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés ultra performants (BFUP).

La formulation de ces bétons, la mieux adaptée possible à une fabrication de produits en béton, est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles en prenant en compte tous les aspects du ou des problèmes posés (caractéristiques des matières premières, caractéristiques et performances des produits fabriqués, coût...).

L'apparition de ces bétons augmente le besoin de caractériser d'une manière fiable le comportement du béton lors de l'écoulement. Plusieurs corrélations entre les caractéristiques rhéologiques (viscosité, seuil d'écoulement) et les grandeurs spécifiques obtenues à travers les essais empiriques les plus couramment utilisés (essai d'étalement, stabilité au tamis, boîte en L, V-Funnel [11, 12]) sont établies. La majorité des auteurs s'accordent sur la nécessité de recourir à au moins deux essais empiriques différents pour établir des relations entre grandeurs spécifiques et caractéristiques rhéologiques des bétons. Ainsi, il est maintenant admis que la viscosité est corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-Funnel alors que le seuil de cisaillement dépend de l'étalement [13, 14, 15].

Mais certains tests empiriques pour mesurer l'ouvrabilité du béton sont parfois contradictoires. Un bon exemple est présenté par Baron [16]. Dans une campagne expérimentale, cet auteur a formulé des bétons en faisant varier le dosage en eau et le rapport Sable/Gravillon, et a effectué des mesures d'ouvrabilité à la fois avec le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL [17]. Il a constaté qu'un béton X pouvait s'affaisser plus qu'un béton Y au cône d'Abrams mais s'écouler moins vite au maniabilimètre LCL. Donc, la caractérisation de l'ouvrabilité du béton frais par un seul paramètre au moyen d'un essai technologique (affaissement, temps d'écoulement, étalement [18]) n'est pas tout à fait suffisante. Il faut donc rechercher d'autres méthodes de caractérisation permettant de mesurer des caractéristiques intrinsèques du matériau à l'état frais. Dans notre étude un autre moyen de

caractérisation rhéologique a été utilisé : l'écoulement de béton dans un V-Funnel couplé à un canal horizontal en plexiglas (fig.1).



Fig.1. étude expérimentale de l'écoulement des bétons

Dans un premier temps nous cherchons à comprendre la corrélation entre la viscosité et les paramètres rhéologiques de béton en se basant sur des modèles proposés dans la littérature. À partir de là, nous cherchons à présenter le modèle qui décrit le comportement de béton. Pour ce faire, nous proposons une corrélation théorique entre la viscosité plastique du béton frais et le temps d'écoulement dans le V-Funnel, puis nous comparons cette solution théorique avec des mesures expérimentales.

Les bétons étudiés au cours de ces travaux de recherche offrent beaucoup d'avantages. Ils peuvent circuler facilement dans des formes complexes tout en améliorant la résistance et la durabilité. Cependant, la pression de ces bétons sur le coffrage est supérieure à celle d'un béton normal [19-21] en raison principalement de la caractéristique rhéologique de ces bétons [22-24].

Cependant des variations de qualité de constituants ou de composition peuvent modifier les propriétés des bétons à l'état frais en générant des phénomènes de ségrégation qui a toujours des conséquences importantes sur l'aspect du béton et le plus souvent aussi sur la qualité. Elle peut résulter d'une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage ou

lorsque le béton passe à travers une zone dense de ferrailage et peut aussi apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise.

Des études portant sur la compréhension des mécanismes du phénomène, des causes principales des divers types de ségrégation et des formes les plus courantes de ségrégation seront tout d'abord présentées. Les recommandations en termes de formulation seront ensuite abordées. Pour cette raison, des techniques spéciales ont été développées dans lesquelles on a tenté de mesurer la remontée d'eau sur une surface verticale (ressuage) et l'homogénéité du béton frais en utilisant l'auscultation sonore (fig. 2).

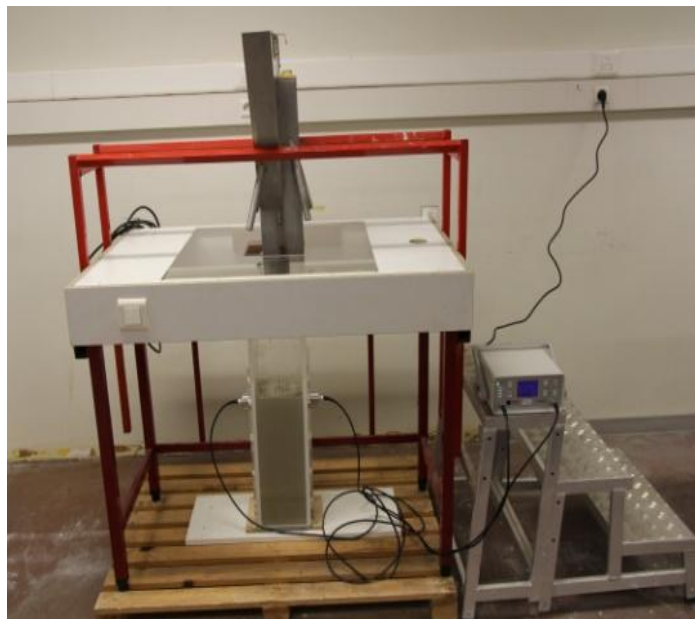


Fig.2. Auscultation sonore des bétons frais

À l'état durci, les nouveaux bétons présentent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et améliore les résistances mécaniques des bétons au jeune âge par effet physique principalement et par effet pouzzolanique lorsqu'elles sont chimiquement actives, à plus longues échéances. Cette amélioration des résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de l'addition.

La prédiction de la résistance à court terme est désormais essentielle dans le domaine de la construction. En effet, le décoffrage dans des délais records tout en respectant le cahier des charges, constitue des opérations critiques pour les

entreprises de BTP. L'évolution de cette propriété dépend de plusieurs facteurs, mais pour une formulation donnée, la température constitue au jeune âge le facteur influençant le plus sur l'hydratation du ciment.

La détermination, au jeune âge, de degré d'avancement des réactions d'hydratation correspondant au durcissement du béton, à partir du suivi de l'histoire de la température au sein de matériaux, représente « la technique de la maturométrie » qui nécessite une bonne maîtrise de la régularité de la fabrication du béton et de ses constituants. Ce concept permet de traduire l'état de mûrissement du béton, c'est-à-dire son niveau de durcissement. Il intègre les effets couplés de la température et du temps sur la cinétique de mûrissement du béton. Dans notre étude, nous essaierons d'identifier l'influence des fibres métalliques et synthétiques sur l'évolution de la température ainsi que le mûrissement du béton.

Pour en savoir plus sur ces bétons innovants et sur les méthodes de caractérisation utilisées, des généralités sur leurs performances sont présentés par la suite.

Ce mémoire décrit les démarches scientifiques adoptées, les résultats obtenus et l'analyse qui en a été faite. Il s'organise en 3 axes :

Un premier axe, consacré à l'analyse bibliographique, définit l'état des connaissances et pratique actuelle de béton, les avantages et l'application des bétons tels que les BAP, les BHP et les BFUP. Il porte aussi sur les matériaux utilisés et leurs rôles ainsi que les formulations de différents bétons (BAP, BHP et BFUP). Ensuite, nous abordons dans cette étude des généralités, des mesures et des corrélations entre la viscosité plastique / le seuil de cisaillement et les paramètres de la rhéologie ainsi que la caractérisation des bétons fluides à l'état frais et les modèles rhéologiques des bétons utilisés dans les différents pays. Enfin, outre les essais mécaniques classiques, nous présentons dans cette partie l'essai de la maturométrie développé pour mesurer l'évolution de la température en fonction du temps.

Un deuxième axe présente une nouvelle approche de l'influence des additions sur l'écoulement du mélange. Il traite aussi la méthode adaptée pour la formulation des BAP. Dans cet axe, nous décrivons également une nouvelle approche pour mesurer théoriquement la viscosité plastique des bétons en utilisant un nouvel outil

expérimental. Ensuite nous abordons des nouvelles techniques pour mesurer la remontée d'eau sur une surface verticale et pour caractériser l'homogénéité des bétons, à l'état frais, par l'auscultation sonore.

Le dernier axe est ensuite consacré à la présentation des résultats expérimentaux obtenus lors des différents essais effectués, nous commençons par les résultats des essais rhéologiques et mécaniques, avant de détailler les résultats d'essais de maturométrie, et nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1: Etat des connaissances et pratique actuelle des bétons

I.	Généralités sur le béton.....	14
II.	Matériaux et leurs rôles.....	15
III.	Famille de bétons.....	26
III.1	Béton à haute performance « BHP »	27
III.2	Béton fibré à ultra performance « BFUP »	31
III.3	Bétons Autoplaçants « BAP »	34
IV.	FORMULATION DE DIFFERENTS BETONS.....	35

Chapitre 2 : Rhéologie et rhéomètres

I.	Définitions	47
II.	Caractérisation des bétons à l'état frais.....	54
III.	Rhéomètres.....	67
IV.	Correlation entre grandeurs spécifiques expérimentales et caractéristiques rhéologiques des bétons.....	75

Chapitre 3 : Caractérisation mécanique des bétons

I.	Essais destructifs	79
II.	Processus de fissuration des bétons	86
III.	Essais non destructifs	88
III.1	Maturométrie	89

Chapitre 1 : ETAT DES CONNAISSANCES ET PRATIQUE ACTUELLE DES BETONS

I. Généralités sur le béton

Le béton est une suspension concentrée de particules solides (sable, gravillon) dans un liquide visqueux (grains de ciment + eau). Il peut contenir aussi des adjuvants, des additions minérales et éventuellement des fibres. Une fois les éléments mélangés et homogénéisés, on obtient un mélange dont la consistance peut varier, en fonction des besoins, de l'état ferme à l'état fluide. Après quelques heures, ce mélange durcit par des réactions chimiques des composés du ciment avec l'eau (hydratation).

Les constituants d'un béton sont généralement disposés de telle sorte qu'une ou plusieurs phases discontinues (granulats) sont incorporées dans une phase continue (pâte de ciment). La phase discontinue est appelée le renfort et la phase continue est la matrice. Les fibres sont ajoutées pour améliorer les propriétés et le comportement du béton.

En outre, les nouveaux bétons contiennent beaucoup d'additifs et adjuvants pour améliorer la maniabilité et la résistance (figure 3). Le volume apparent du béton est occupé par les agrégats (qui occupent environ 75% du volume total), dont les particules solides peuvent varier en taille de 0,1 μm à 30 mm; le diamètre des fibres est généralement compris entre 1 μm à 3 mm avec des longueurs d'environ 1 mm jusqu'à 500 mm. La structure nanométrique et micrométrique de la pâte de ciment durcie dépend fortement du rapport eau/ciment, la composition des grains, la température d'hydratation, la présence d'adjuvants chimiques au moment de l'hydratation et le degré d'hydratation.

De ce fait, le béton est plein de défauts, tels que les pores, les vides d'air et les microfissures provoquées par le retrait et les déformations thermiques. Les paramètres principaux qui influent sur les propriétés du béton durci sont : (1) les propriétés de la pâte de ciment hydraté (la matrice), par exemple porosité et

microfissures; (2) les propriétés des agrégats; et (3) l'interface entre la pâte de ciment hydraté et les granulats.

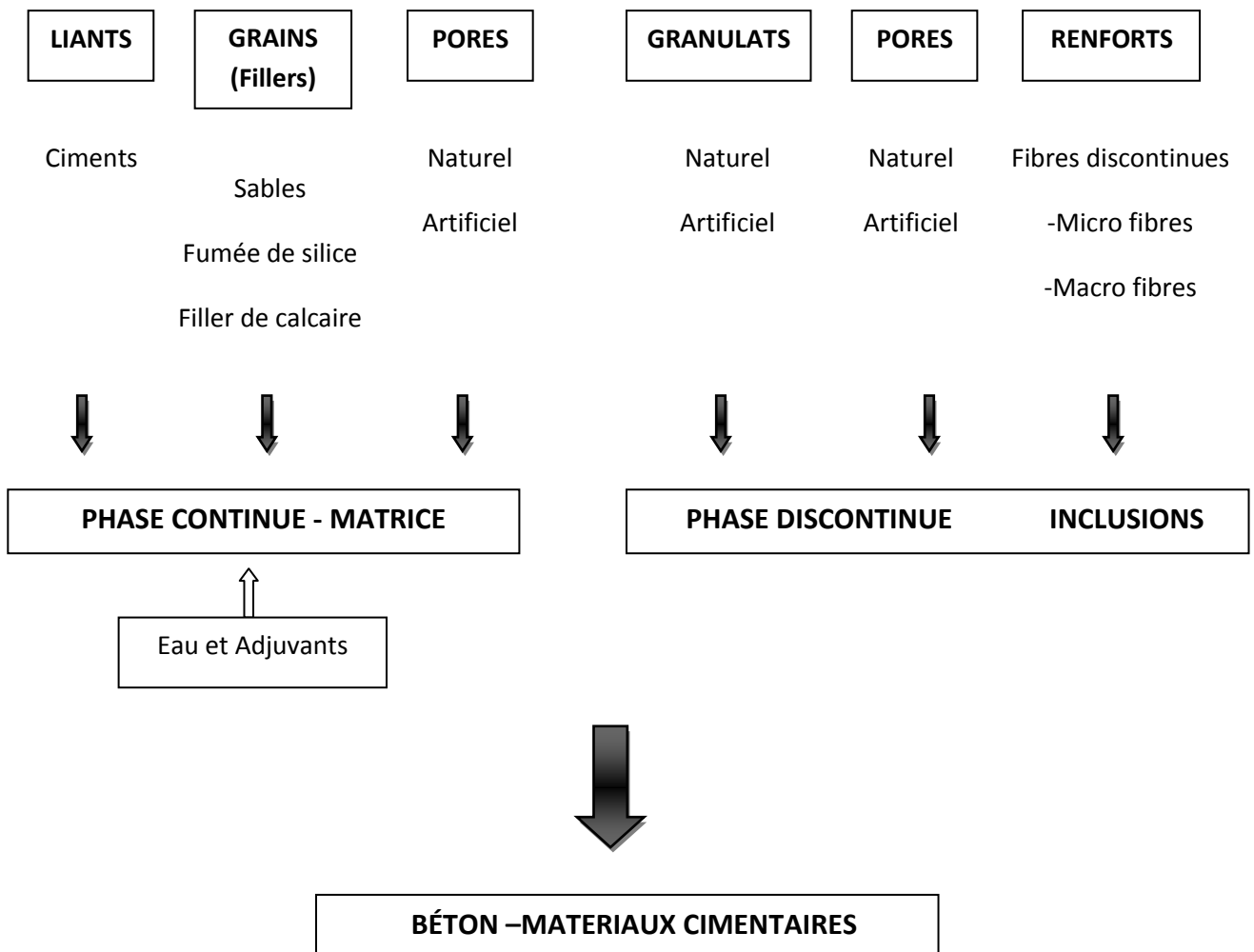


Figure 3. Constituants du béton, Brandt (1995) [25].

II. Matériaux et leurs rôles

II.1 Granulats

Les granulats constituent le squelette inerte du béton. Ils sont agglomérés par le liant pour former une « pierre artificielle » ; ils confèrent ainsi au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique [26].

Pour que le squelette soit le plus compact et le plus durable possible, il est nécessaire que les granulats satisfassent à des exigences tant au niveau de leur

nature minéralogique qu'au niveau des techniques de fabrication (taille, forme, rugosité). Cependant, pour obtenir une ouvrabilité correcte, une courbe granulométrique continue est plutôt recherchée. Le but de la granulométrie est donc de remplir les trous entre les gros granulats, par d'autres granulats de plus petit diamètre c'est-à-dire de sélectionner la quantité de granulats de chaque dimension pour optimiser le remplissage et minimiser la quantité de ciment.

D'une manière pratique, l'optimisation de l'ensemble du squelette granulaire passe, tout d'abord, par l'optimisation du réseau formé par des sables et des gravillons, ensuite l'extension se fait par le remplissage des vides par le ciment et les fines qui viennent compléter et améliorer la continuité du réseau granulaire.

II.2 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, finement moulu de roche calcaire (craie) et de schiste (argile), homogénéisé, séché, décarbonaté puis fondu dans un four rotatif. Ensuite ce mélange est refroidi rapidement et enfin broyé. On obtient ainsi le clinker.

La composition chimique du clinker (finement broyé pour donner un ciment) se répartit entre quatre grandes espèces : l'Aluminate (C_3A), la Bélite (C_2S), l'Alite (C_3S) et la Célite (C_4AF). Le C_3A est le plus rapide à s'hydrater, mais contribue peu à la résistance ; au contraire, le C_2S est lent à réagir, mais donne des résistances à long terme; Quant au C_3S , il procure des caractéristiques mécaniques à tous les âges. La réaction du C_4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [27].

Le processus d'hydratation du ciment est une séquence complexe de réactions chimiques entre les composants de clinker, sulfate de calcium et de l'eau, conduisant à la prise et au durcissement. Après le malaxage du ciment et l'eau, les réactions commencent à se produire, et elles génèrent un dégagement de chaleur (stades 0 et I de la figure 4). Après ses premières étapes d'une période d'induction, ou période dormante, il y a l'apparition de " stade II " au cours de laquelle l'hydratation commence à se dérouler. La Prise (stade III) est définie comme étant le début de la rigidité du béton frais alors que la période de fluidité correspond à la période d'induction (stade II). Après environ 24 heures, le taux d'évolution de la chaleur

diminue, même si l'hydratation peut se poursuivre indéfiniment tant qu'il y a de l'eau et de l'espace disponible pour les grains de ciment qui n'ont pas totalement hydraté.

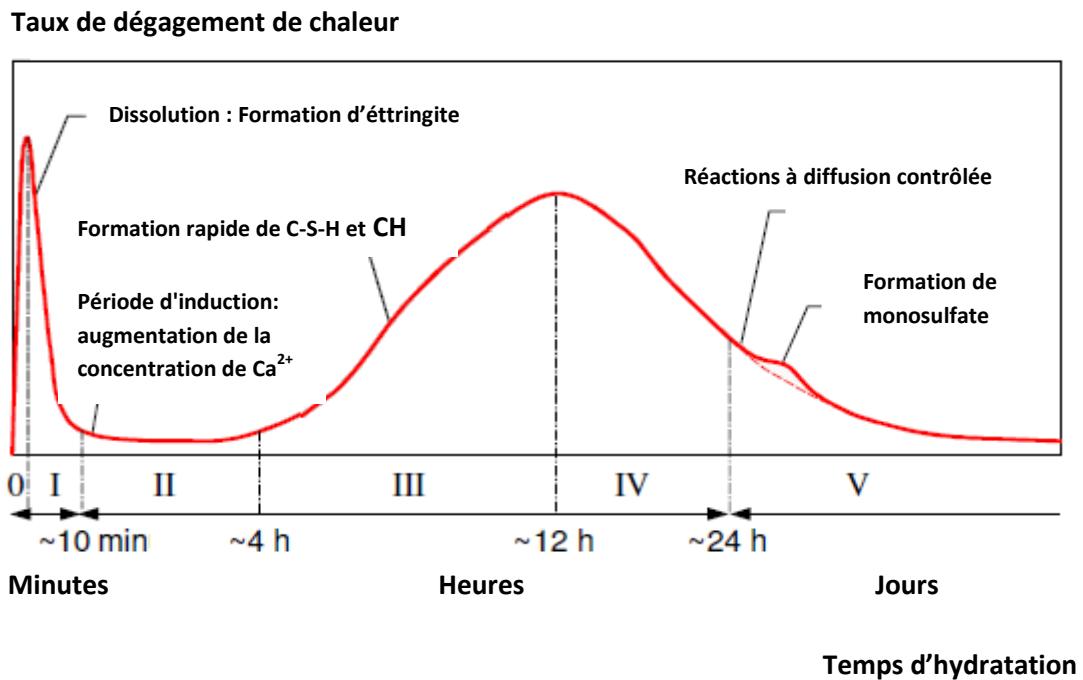


Fig. 4. Représentation schématique de l'évolution de la chaleur lors de l'hydratation d'un ciment, Gartner et al. (2002) [28].

D'une manière pratique, pour augmenter la quantité de pâte d'un béton, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des ajouts minéraux afin d'assurer un développement durable du matériau béton.

II.3 Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux en fines particules qui peuvent être ajoutés en quantités limitées pour influencer certaines propriétés ou obtenir des propriétés particulières. Selon la norme EN 2006, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes. On distingue quatre classes :

II.3.1 Fillers calcaires

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Ils sont soit récupérés lors du concassage des granulats calcaires et peuvent alors contenir des résidus argileux et des matières organiques, soit obtenus par broyage du matériau cru. Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium (CaCO_3). Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires peuvent jouer plusieurs rôles:

- un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3S et du C_3A .
- un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires sur les performances rhéologiques des bétons. Voir les travaux de Bilberg, 1999 [29], Zhu et Gibbs, 1999 [30], Kara-Ali R., 2002 [31].

II.3.2 Fumée de silice

Les fumées de silice sont des poudres amorphes de silice extrêmement fines, des sous-produits de l'industrie du silicium et de ses alliages. Leur teneur en SiO_2 peut dépasser 90%. Conformément à la norme EN 13263, elles fournissent de très bonnes propriétés aussi bien au niveau de la rhéologie qu'au niveau des propriétés mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité du béton. Ses caractéristiques très particulières en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à :

- la pouzzolane réagit avec l'eau en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme.
- en plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés, ce qui améliore la compacité.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout de fumée de silice sur les performances mécaniques et les caractéristiques rhéologiques des bétons. Voir les travaux de R. Sersale [32], H. Pichon et al.[33], Park Noh [34] Ferraris et al. [35], Shi et al. [36], Carlsward et al. [37].

II.3.3 Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques.

L'intérêt des cendres volantes réside dans la faculté qu'elles possèdent à réagir avec l'hydroxyde de calcium pour former des silicates de calcium hydratés qui ont des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques (rétention d'eau).

D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux.

En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces. (Pour une plus ample information sur les cendres volantes voir [38-40]).

II.3.4 Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium CaO, de la silice SiO₂, de l'alumine Al₂O₃ ainsi que la magnésie MgO et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker.

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc davantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. (Pour une plus ample information sur le laitier de haut fourneau voir [40-42]).

En résumé, les nouveaux bétons présentent alors une rencontre concrète des combinaisons spéciales de performance qui ne peut pas toujours être atteinte en utilisant systématiquement des constituants classiques du béton normal [43, 44]. Par exemple, la propriété rhéologique des bétons fluides devrait être: « le placement et compactage plus facile sans affecter la résistance ». Cette propriété peut être obtenue de deux façons: soit en réduisant la gamme des tailles de grains [45] ou en réduisant la floculation des grains de ciment par l'utilisation des adjuvants.

II.4 Adjuvants

La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale :

- Adjuvants modificateurs de prise du béton
 - Accélérateurs de prise : permettent d'accélérer les réactions de dissolution et le développement des hydrates, donc la cinétique de prise. Leurs effets sur le béton sont : accélération de la prise, augmentation des résistances à court terme et augmentation de la chaleur d'hydratation.
 - Retardateurs de prise : permettent de ralentir les réactions de dissolution et le développement des hydrates. Leurs effets sur le béton sont : décale le temps de prise, diminue les résistances initiales et améliore les longues ouvrabilités.

- Autres catégories normalisées d'adjuvants
 - Hydrofuges : agissent par précipitation dans les pores des bétons (réaction avec la chaux libre naturellement issue de l'hydratation du

ciment) ce qui forme des bouchons qui bloquent la pénétration des liquides dans le béton.

- Entraîneurs d'air : permettent d'entraîner des bulles d'air calibrées, réparties de manière homogène dans le béton et de façon durable. Leurs effets sur le béton sont : les bulles stabilisent les grains (correcteur granulaire), amélioration de la cohésion et de l'ouvrabilité (effet de réduction d'eau) et amélioration de l'aspect au décoffrage.

- Adjuvants modificateurs de la rhéologie du béton:

La fonction principale de ce type d'adjuvant est de réduire la teneur en eau du béton sans modifier la consistance. Cet effet est plus ou moins fort selon le niveau de réduction d'eau recherchée :

- Plastifiants réducteurs d'eau : 5 à 10 %
- Superplastifiants haut réducteurs d'eau : 10 à 30%

D'une manière générale, les adjuvants les plus utilisés dans la fabrication des nouveaux bétons (bétons fluides) sont les superplastifiants.

II.4.1 Superplastifiants

Les superplastifiants introduits dans un béton, avant sa mise en œuvre, ils ont pour fonction principale de provoquer un fort accroissement de l'ouvrabilité du mélange (fig. 5).



Fig. 5. Action des superplastifiants

Ce sont en général des produits de synthèse organique. Les plus utilisés sont les dérivés de mélamines ou de naphthalène. En 1998, de nouvelles molécules issues de l'industrie chimique, les polyacrylates et les polycarboxylates, ont considérablement

amélioré les performances des superplastifiants. Ces adjuvants dits de « nouvelle génération » ont permis notamment le développement des nouvelles familles de béton.

L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment (fig. 6). Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains. En plus de leur charge ionique, certaines molécules vont présenter une structure chimique très encombrée une fois à la surface des grains de ciment, ce qui aura alors pour effet d'empêcher le rapprochement des grains de ciment les uns vis-à-vis des autres : c'est la répulsion stérique (fig. 7). L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton [46].

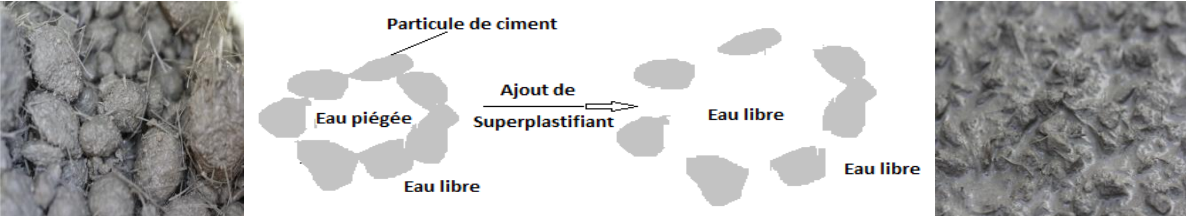


Fig. 6 : Dispersion des grains de ciment par l'ajout du polymère.

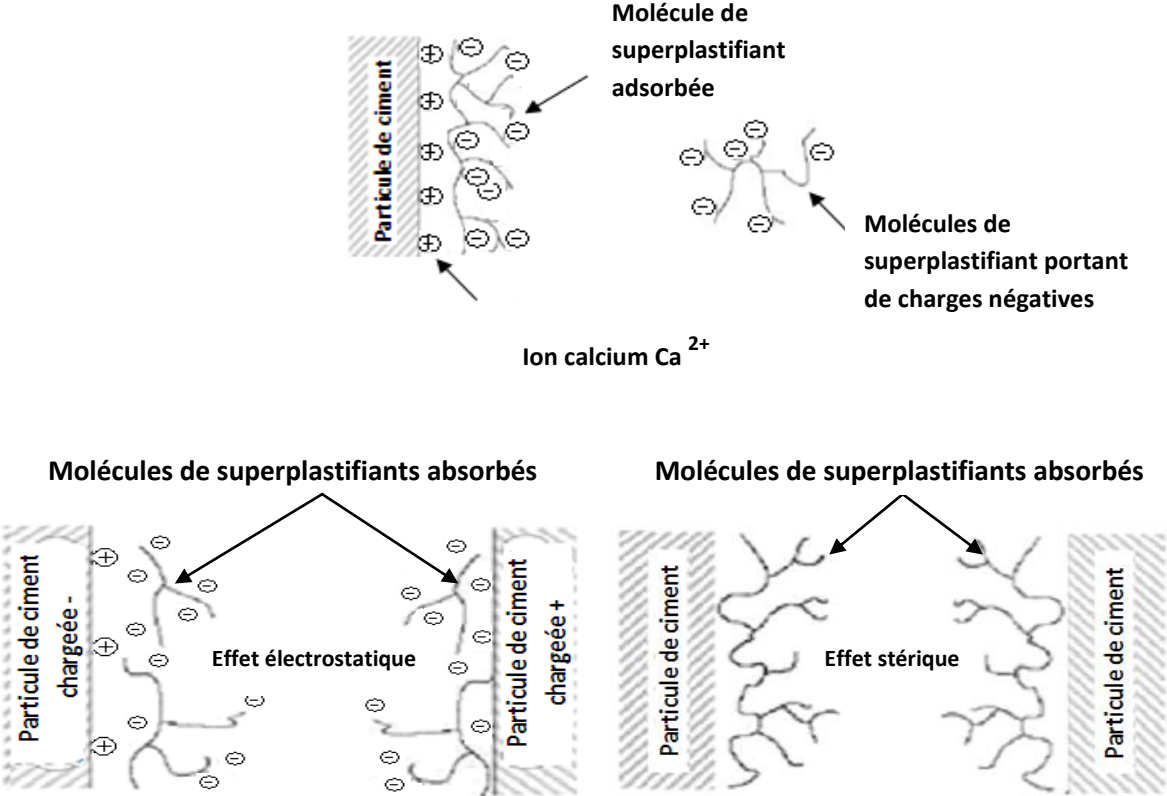


Figure 7. Action des Superplastifiants : Défloculation des grains de ciment.

En résumé, sur le béton frais, on constate une augmentation considérable de l'ouvrabilité pour une même teneur en eau. La réduction d'eau de gâchage entraîne une réduction du rapport eau/ciment, qui améliore généralement les résistances et réduit la porosité totale du matériau, améliorant ainsi sa durabilité. Voir les travaux de Ramachandran et al., 1998 [47], Flatt et al., 2001 [48], Uchikawa et al., 1997 [49], Spiratos et al., 2003 [50], Khorami et Aïtcin, 1989 [51].

Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé aux problèmes de ségrégation et une faible résistance à la traction [52]. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide et stable en utilisant des superplastifiants. En outre, l'utilisation d'une matrice renforcée par des fibres permet de stabiliser les propriétés de traction.

II.5 Fibres

Différents types de fibres peuvent être utilisés pour le béton, en fonction de la matière première à partir de laquelle ils sont produits. On trouve des fibres organiques (polymères naturels et synthétiques) et des fibres inorganiques (métalliques).

La fibre métallique est géométriquement caractérisée par la longueur L , la forme et le diamètre équivalent D_e (fig. 8). Le rapport entre la longueur L et le diamètre équivalent D_e fournit le rapport d'aspect, ou rapport de forme ($\lambda = L / D_e$).

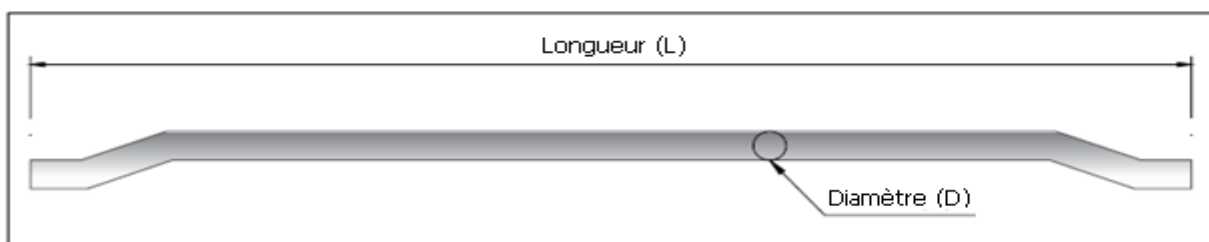


Figure 8. Les fibres d'acier dont les extrémités recourbées.

Axialement, la forme peut être linéaire ou non; transversalement, la fibre peut être ronde, rectangulaire ou d'une section transversale irrégulière (figure 9).

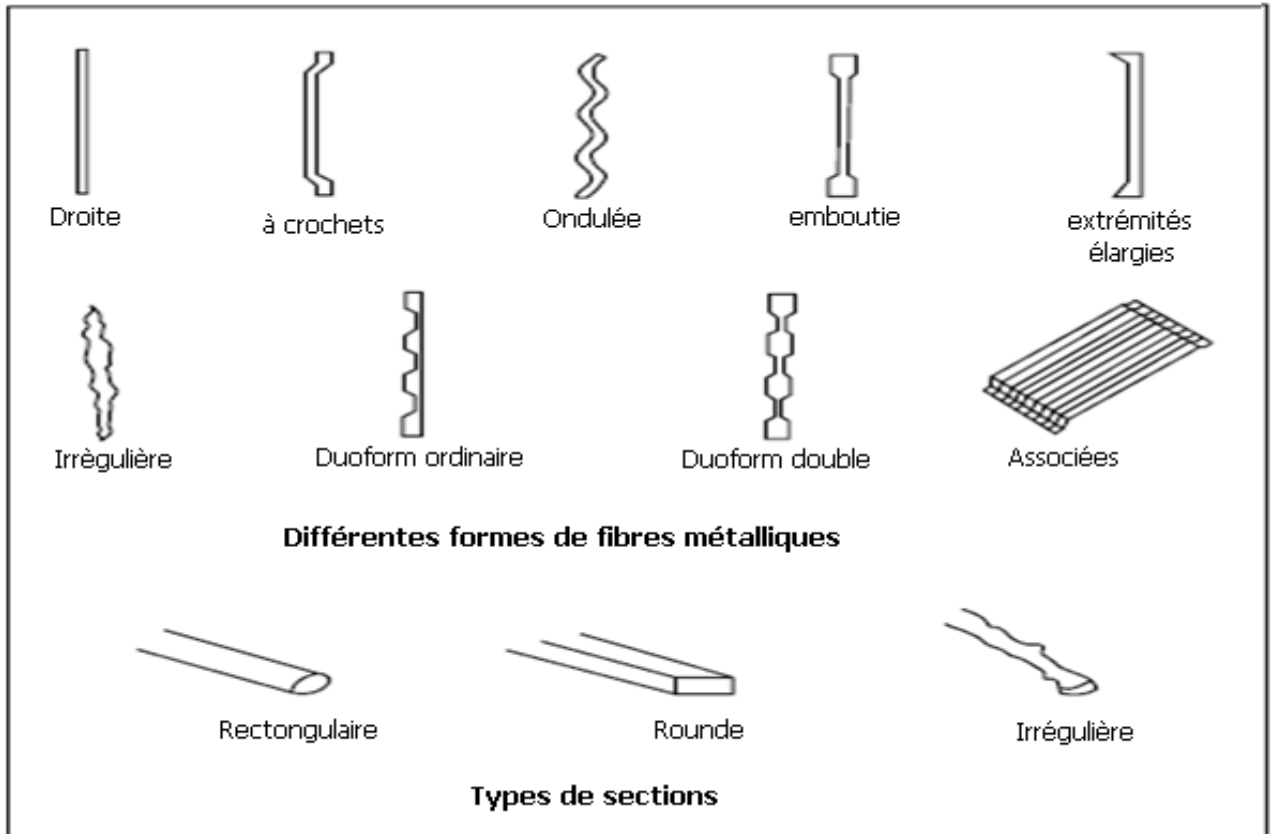


Fig. 9. Les différents types de fibres métalliques [53].

Les fibres métalliques permettent de « couder » les microfissures et évitent leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macro fissures. Elles apportent des caractéristiques mécaniques post-fissurations au béton.

La fibre synthétique la plus utilisée dans les bétons peut être schématisée comme indiqué par la figure suivante (fig. 10) :

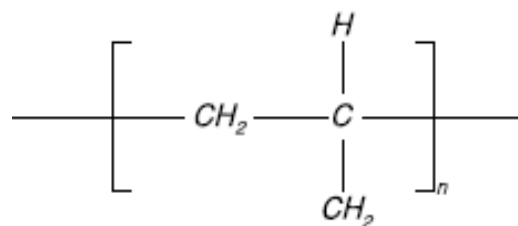


Fig. 10. Fibre synthétique de nature Polypropylène

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration (couder les microfissures) et à la résistance aux chocs ainsi que l'amélioration de la cohésion du béton.

Il est évident que tous ces comportements dépendent à la fois de la quantité des fibres présentes ainsi que de leurs caractéristiques géométriques et mécaniques (fig. 11 et 12).

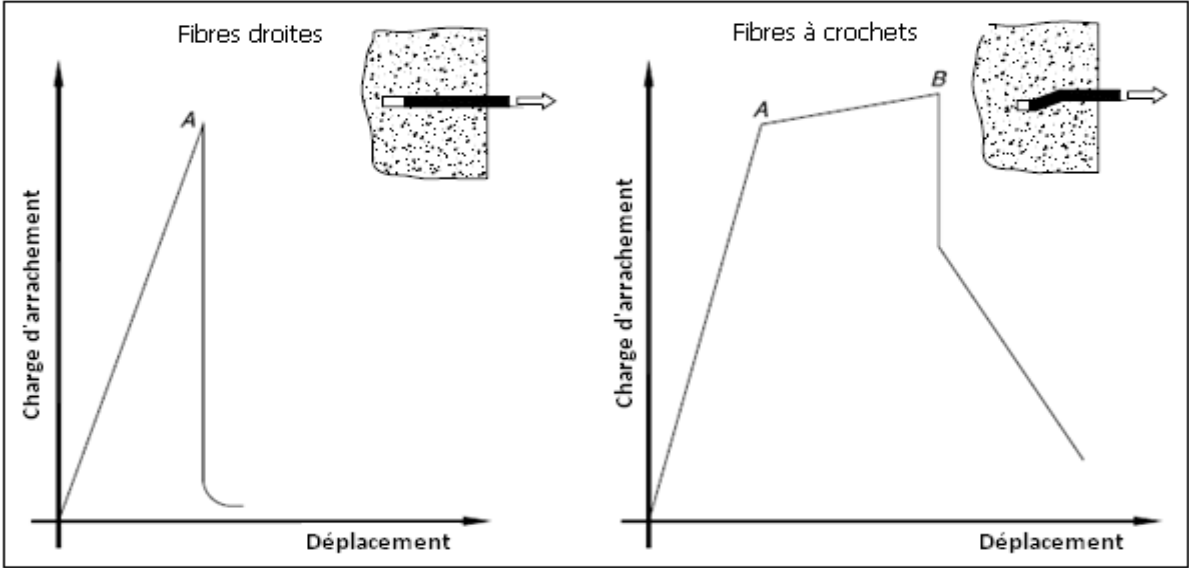


Fig. 11. Augmentation de l'adhérence fibre-béton avec la forme de fibres [53].

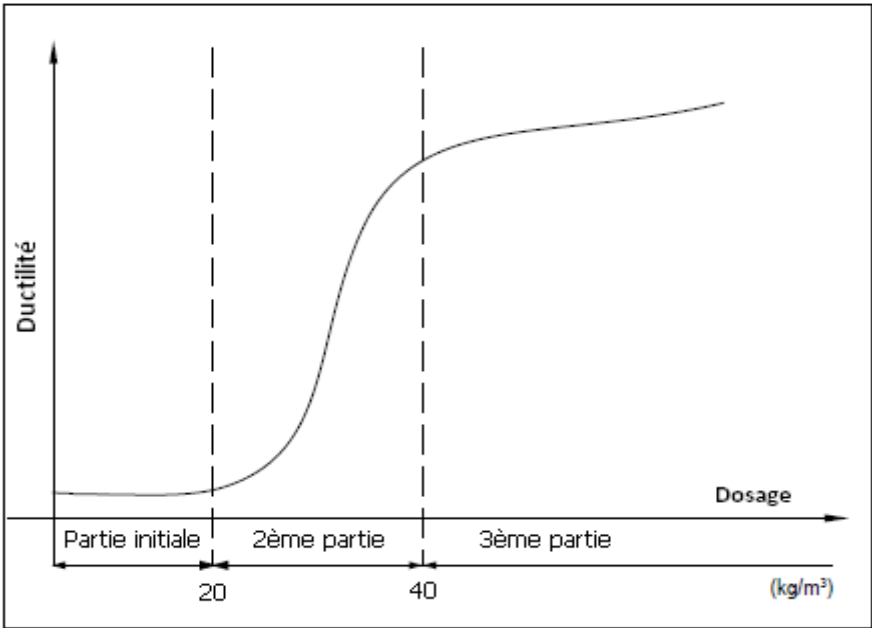


Fig. 12. Ductilité en fonction de dosage en fibres

La partie initiale de la courbe montre comment un dosage très faible n'a pratiquement aucun effet parce que, si seulement quelques fibres sont dispersées dans le mélange, leur distance relative est plus élevée et donc aucune résistance n'est produite.

La deuxième partie montre comment, en augmentant le nombre de fibres, les configurations de superposition statique des fibres entre elles, avec la forte possibilité d'interagir, sont atteintes. Ainsi, une augmentation de la ductilité du béton est produite.

Enfin, la troisième partie montre comment, en surmontant une certaine dose, l'augmentation de la ductilité est insignifiante. De ce fait, il devient en revanche plus difficile d'obtenir un mélange fluide et homogène.

Dans l'absolu, on ne peut pas dire qu'une fibre est meilleure qu'une autre. En fait, tout dépend du but recherché car toutes les fibres de renforcement n'agissent pas selon le même mécanisme. Voir les travaux de A.G. Sarzalejo et al. [53], Rossi et al. [54], Naaman [55].

III. Famille de bétons

Le béton est un matériau en pleine révolution. Depuis ses débuts, les progrès sont énormes, notamment dans l'amélioration de la résistance du béton. Cependant, ce n'est pas seulement la résistance qui a été augmentée. Ces derniers temps d'autres propriétés ont été considérées comme essentielles, par exemple : la durabilité, la ténacité et l'ouvrabilité. Il apparaît clairement aujourd'hui que les bétons nécessitent de mener une réflexion en ayant une approche à l'échelle de l'ouvrage et non plus seulement au niveau du produit.

Des exemples de ce développement peuvent être vus dans: Bache (1989) [56], Li (1995) [57], Walraven (1999) [58], Brandt et Kucharska (1999) [59], Guse et Müller (2000) [60], Guerrini (2000) [61], Zilch (2000) [62], Aïtcin (2000) [63], Harryson (2002) [64], Bentur (2002) [65], Bennett (2002) [66], Chong et Garboczi (2002) [67]. Avec ce développement, il est maintenant possible d'obtenir certaines propriétés prédéfinies en adaptant une certaine composition de mélange. Les exemples de « nouveaux » types de bétons sont :

- bétons à hautes performances « BHP »
- bétons fibrés à ultra performance « BFUP »
- bétons autoplaçants « BAP »

La composition de différents bétons est présentée sur la figure suivante (fig. 13):

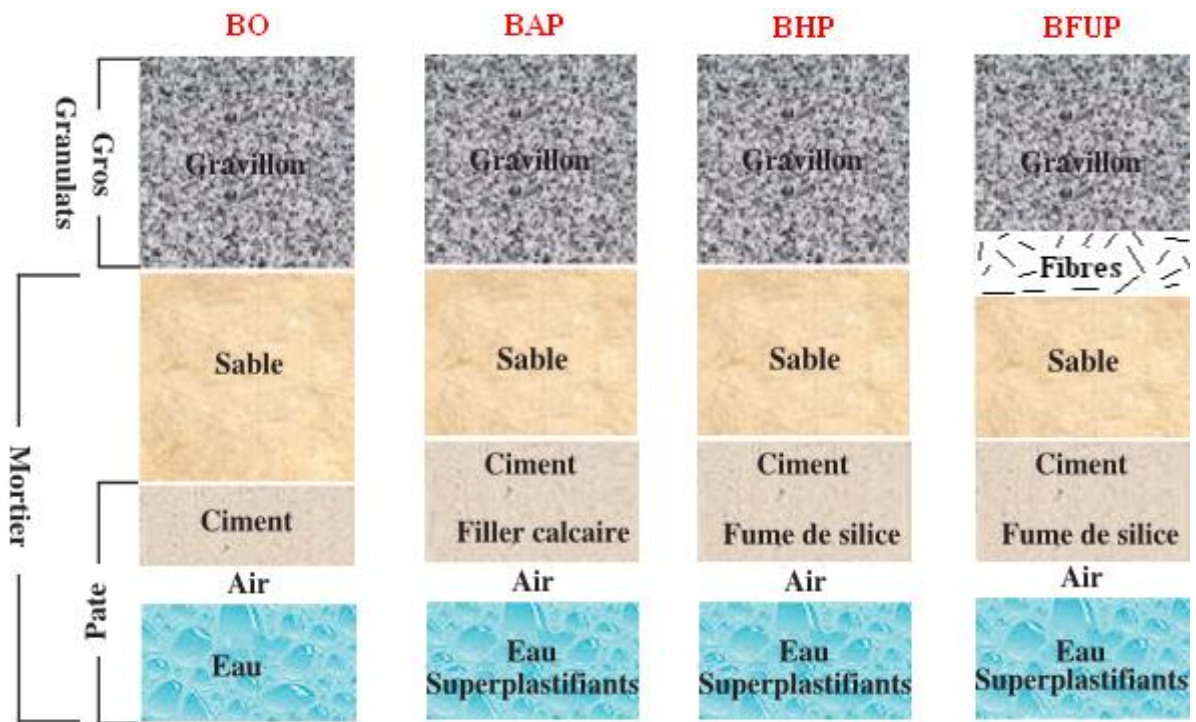


Fig. 13. Composition d'un béton ordinaire (BO), d'un béton autoplaçant (BAP), d'un béton à haute performance (BHP) et d'un béton fibré à ultra performance (BFUP).

III.1 Bétons à hautes performances « BHP »

Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un « béton à haute résistance » à partir d'une classe de résistance de C55/67. Comme le terme l'indique, se caractérise comme béton ayant une résistance à la compression plus élevée que le béton normal. La frontière entre la résistance normale et haute n'est pas fixée et a augmenté avec le temps ; aujourd'hui, le béton ayant une résistance à la compression supérieure à 60 à 80 MPa peut être considéré comme de haute résistance. En plus ses performances permettent d'optimiser et de simplifier la conception et le dimensionnement des structures.

De ce fait, plusieurs chercheurs ont tenté de réduire le dosage en eau et d'obtenir un mélange de très haute compacité (fig. 14) induisant une très faible porosité [68].

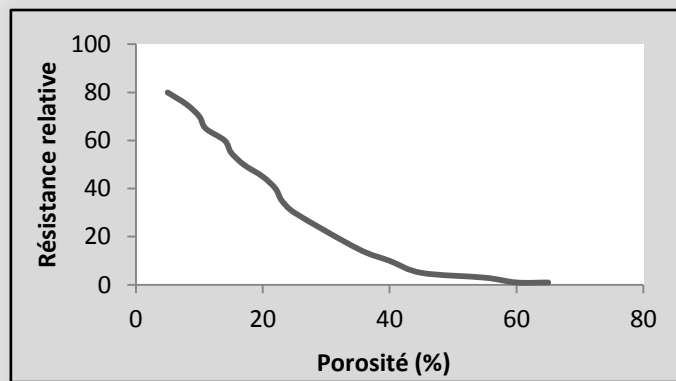


Fig. 14. Lien entre la porosité du béton et sa résistance établi par Féret [69]

Les performances de BHP peuvent être augmentées par : (1) l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique comme la fumée de silice. Chimiquement, elle est réactive et destinée à remplir les micro-vides de l'empilement de grains en améliorant ainsi la compacité du mélange tout en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais; (2) la défloculation des grains de ciment par l'emploi de superplastifiant qui permet aux grains de ciment en suspension dans l'eau de se libérer des forces de Van der Waals. La formulation des BHP à l'aide de superplastifiants leur confère une grande fluidité, ce qui conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau nécessaire puisqu'une forte part n'est plus piégée dans les floccs de grains de ciment.

Ces méthodes permettent donc de réaliser des structures soumises à des contraintes élevées apportant au béton des résistances aux jeunes âges très élevées. Ces bétons passent de 80 MPa à plus de 200 MPa pour les bétons à très hautes performances (BTHP) à très faibles rapports E/C. En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas neuf. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique (fig. 15).

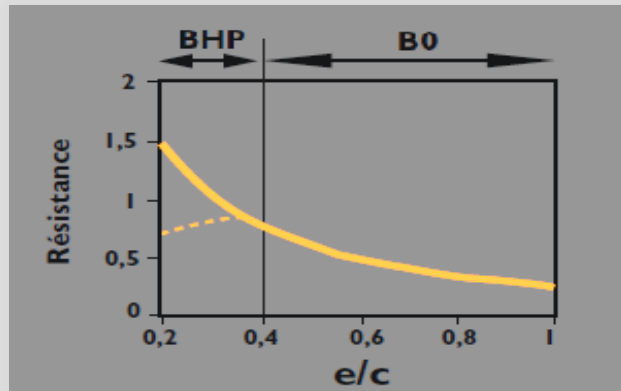


Fig. 15. Résistance du béton par rapport à celle du ciment

Grâce à cela, les bétons présentent une meilleure rhéologie avec pourtant moins d'eau (utilisation des superplastifiants). Par ailleurs, les grains étant mieux répartis, la résistance est plus homogène et améliorée. À l'échelle microscopique, le BHP présente une structure plus fermée qu'un béton courant (fig. 16).

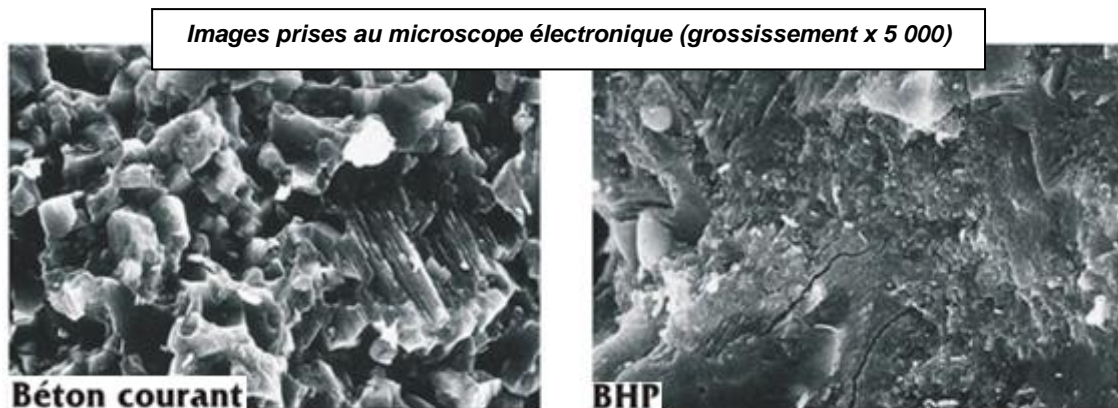


Fig. 16. Analyse microscopique d'un béton courant et d'un BHP

La fiche suivante présente les atouts et les performances des BHP:

ATOUTS	PERFORMANCES	SURCOUT	GAIN ET COMMENTAIRES
Propriétés exceptionnelles à l'état frais	<p>Maniabilité</p> <p>Pompabilité</p> <p>Stabilité</p>	Superplastifiant	<ul style="list-style-type: none"> - garantit un bon remplissage des moules et des coffrages et un enrobage - facilite la mise en œuvre, en particulier dans les zones très ferraiées - améliore le rendement de mise en place du béton - permet des bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles - une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation - une faible viscosité, qui autorise le pompage sur de longues distances.
performances mécaniques élevées	Résistance aux jeunes âges	<p>Types de ciment</p> <p>Faible rapport E/C</p> <p>Dosage en ciment</p>	<ul style="list-style-type: none"> - décoffrages rapides et une accélération et optimisation des cycles de coffrage/décoffrage - des délais avant mise en tension des armatures de précontraints raccourcis
Accroissement de la durabilité	<p>Faible porosité</p> <p>Forte compacité</p>	Fumée de silice	- Amélioration de la durée de service des ouvrages soumis à des conditions climatiques rigoureuses, des agressions chimiques ou à des ambiances marines

L'utilisation du béton à hautes performances progresse rapidement, et, par exemple, il a été utilisé dans le pont de Normandie:



Pont de Normandie. Les voussoirs des rampes d'accès ont été fabriqués avec du BHP de résistance 60MPa.

L'industrie du béton est devenue une industrie de haute technologie. Depuis ses débuts, les progrès sont énormes, notamment dans l'amélioration de la résistance à la compression du béton. Cependant, ce n'est pas seulement la résistance à la compression qui a été augmentée. Ces derniers temps la résistance en traction a été considérée comme essentiel. L'utilisation d'une matrice renforcée par des fibres permet de stabiliser les propriétés de traction. Il est maintenant possible d'obtenir ces propriétés en adaptant une certaine composition de mélange. C'est le cas du béton fibré à ultra performance (BFUP).

III.2 Bétons fibrés à ultra performance « BFUP »

Les BFUP sont des matériaux fluides, à fort dosage en liant qui nécessitent une sélection particulière des granulats et un emploi de fibres pour assurer la ductilité du matériau. Avec une résistance à la compression de 130 à 200 MPa à 28 jours d'âge et une résistance en traction élevée (jusqu'à 12 MPa), ils ouvrent la porte à de nouvelles formes d'ouvrages.

Généralement, le béton renforcé de fibres est un béton contenant des fibres dispersées. Par rapport aux armatures classiques, les caractéristiques des fibres de renforcement sont les suivantes: (1) les fibres sont généralement réparties dans une section transversale, tandis que les barres d'armature sont placées seulement en cas de besoin; (2) les fibres sont relativement courtes et rapprochées, tandis que les barres de renforcement sont continues et non rapprochées.

Cela signifie que, à la différence du béton ordinaire, la ténacité augmente significativement grâce aux fibres qui transmettent la force à travers la matrice cimentaire. L'avènement du renfort en fibres a donc prolongé la polyvalence du béton comme matériau de construction en fournissant une méthode efficace pour surmonter sa fragilité intrinsèque.

La résistance en traction apportée par les fibres est en revanche très sensible aux conditions de réalisation :

- tout écoulement éventuel lors de la mise en œuvre tend à orienter les fibres dans le sens de l'écoulement.
- les fibres proches des parois sont naturellement orientées parallèlement aux coffrages. Ce phénomène n'intervient que sur une profondeur inférieure ou égale à la longueur des fibres. Il a ainsi d'autant plus d'influence sur la résistance en traction effective des pièces que l'épaisseur des structures est proche de la dimension des fibres.
- une orientation privilégiée des fibres dans le sens de la gravité peut parfois se produire, liée au comportement naturel des fibres dans la phase liquide visqueuse que constitue le béton avant la prise.

Il est évident que tous ces comportements dépendent à la fois de la quantité des fibres présentes ainsi que de leurs caractéristiques géométriques et mécaniques.

Les BFUP se distinguent des bétons à très hautes performances par :

- leur résistance à la compression, systématiquement supérieure à 150 MPa ;
- l'emploi systématique de fibres, qui assurent la non-fragilité du matériau et modifient le recours classique aux armatures actives ou passives ;
- leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

L'utilisation des fibres dans le béton n'est pas un concept nouveau, mais ce n'est que récemment qu'il semble y avoir un usage significatif dans les applications structurales. Par exemple, il a été utilisé dans :



La résille

Poteau



Musée des Civilisations d'Europe et Méditerranée MuCEM - Marseille, France

Le principal avantage d'inclure des fibres dans les matrices est qu'il améliore la ductilité/ténacité et la relation contrainte-déformation/fissure. Les types de fibres couramment utilisés sont l'acier et le polypropylène. Les fibres métalliques interviennent à l'échelle de la structure en apportant de la capacité portante et de la ductilité. Comme les armatures traditionnelles de béton armé, les fibres ont pour objectif de maîtriser la propagation des fissures. On peut dire qu'il s'agit d'un béton armé à l'échelle locale. Tandis que les fibres synthétiques (en polypropylène) sont principalement utilisés pour "coudre" les microfissures et d'éviter leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macrofissures.

À part l'amélioration de la résistance du béton, ces derniers temps d'autres propriétés matérielles ont été considérés comme essentiels – par exemple : l'ouvrabilité et la rhéologie. Avec ce développement, il est maintenant possible d'obtenir certaines propriétés prédéfinies en adaptant une certaine composition de mélange. C'est le cas du béton autoplaçant.

III.3 Bétons Autoplaçants « BAP »

Le béton autoplaçant est un béton innovant qui ne nécessite pas de vibrations pour le placement et le compactage. Il est capable de s'écouler sous son propre poids, remplissant complètement le coffrage même en présence du renfort congestionné. Le béton durci est dense, homogène et possède des propriétés mécaniques plus grandes que celles assurées par le béton vibré traditionnel.

Le béton qui nécessite peu de vibrations ou de compactage a été utilisé en Europe depuis le début des années 1970, mais le béton autoplaçant n'a pas été développé jusqu'à la fin des années 1980 au Japon. En Europe, il a probablement été d'abord utilisé en travaux de génie civil pour les réseaux de transport en Suède en 1990 et depuis lors, le BAP a trouvé une utilisation croissante dans tous les pays européens.

Le développement des bétons autoplaçants est considéré comme un exploit dans la technologie du béton en raison de plusieurs avantages: haute performance de béton à l'état frais et durci (fluidité élevée et une résistance à la ségrégation suffisante, faible porosité, haute résistance et durabilité, etc.); des applications plus larges et de grande hauteur (des structures de forme complexe et fortement ferrillées, ouvrages traditionnels du bâtiment, radiers et fondations superficielles, etc.); modernisation des processus de construction; protection de l'environnement due à la consommation élevée de sous-produits industriels; amélioration de l'environnement de travail par une réduction du coût de la main-d'œuvre et du bruit dû à l'absence de la vibration.

Il présente cependant certains inconvénients: augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants) et modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

L'utilisation du béton autoplaçant progresse rapidement, et, par exemple, il a été utilisé dans :



Théâtre de St-Nazaire - France, Surface : 6 886 m²

Actuellement le BAP est utilisé dans la plupart des pays européens. L'utilisation de BAP est très intéressante aussi bien pour les producteurs de béton prêt à l'emploi que pour les fabricants d'éléments préfabriqués. Toutefois, le manque de processus de normalisation et de mémentos pratiques a fait longtemps obstacle à la popularité croissante du BAP. La norme européenne générale EN 206 a permis de remédier à cette situation puisqu'elle contient enfin les exigences et les spécifications auxquelles doit répondre le BAP.

En conclusion, il existe une très grande variété de matériaux dans le monde et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur la résistance et l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est difficile de réaliser une formulation universelle de béton.

Ces nouveaux bétons présentent des combinaisons spéciales de performance et des exigences qui ne peuvent pas toujours être atteintes en utilisant systématiquement des constituants classiques de béton normal [1, 6].

IV. Formulation de différents bétons

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et la consistance souhaitées.

Mais la formulation des nouveaux bétons est une opération plus complexe que celle des bétons classiques, car le nombre de paramètres à gérer est plus élevé (jusqu'à trois constituants supplémentaires). Le point critique consiste souvent à « marier » un ciment, un ajout minéral et un superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide.

IV.1 Formulation des Bétons à hautes performances

Les bétons à hautes performances BHP sont des bétons qui développent dès le jeune âge des résistances élevées et permettent de réaliser des structures soumises à des contraintes élevées telles que les ouvrages d'art. Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité qui implique essentiellement deux conditions :

- une très faible teneur en eau;
- une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

L'optimisation de l'ensemble du squelette granulaire passe, tout d'abord, par l'optimisation du réseau formé des sables et des gravillons, ensuite l'extension se fait par le remplissage des vides par le ciment et les ultrafines (ex. fumées de silice) qui viennent compléter et améliorer la continuité du réseau granulaire.

Plusieurs méthodes de formulation basées sur le concept de la compacité maximale et du mélange optimal des granulats existent. Ces méthodes permettent de minimiser la porosité du squelette granulaire de mélange de béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires de sables et de gravillons : Méthode de Caquot, Méthode de Faury, Méthode de Bolomey, Méthode de Dreux – Gorisse, Méthode de Talbot - Fuller – Thompson, Méthode de Baron – Lesage, Méthode de Larrard [70].

L'optimisation de la composition des BHP est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau qui représente trois principaux types:

- des bétons possédant une grande fluidité (affaissement supérieur à 180 mm). Leur rapport eau/ciment est similaire à celui d'un béton traditionnel. La

présence de superplastifiant améliore les propriétés rhéologiques du béton et donc sa mise en œuvre.

- des bétons de faibles rapports eau/ciment. Ils permettent d'obtenir une résistance aux premiers âges élevée et une meilleure durabilité.
- des bétons dont les teneurs en ciment et en eau sont réduits pour une mise en œuvre et une résistance donnée. Ces bétons permettent de réduire la chaleur libérée par l'hydratation du ciment.

Ces types des bétons à hautes performances mettent en avant l'importance de différents paramètres liés à la formulation :

- validation de la compatibilité ciment / adjuvant ;
- ajustement de la quantité de pâte et du superplastifiant ;
- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants.

Les méthodes d'optimisation du squelette granulaire des BHP mettent en avant l'importance de différents paramètres liés à la formulation d'un béton de haute performance, notamment l'intérêt des superplastifiants et de la fumée de silice dans l'acquisition d'une meilleure compacité du mélange granulaire et l'obtention des résistances à compression élevées.

L'objectif de rendre le béton plus résistant en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout des fibres dans la formulation du béton.

IV.2 Formulation des bétons fibrés à ultra performance

Les BFUP constituent une gamme de béton complémentaire aux bétons traditionnels. Compte tenu de leurs caractéristiques, les nouveaux bétons se positionnent davantage comme des concurrents au béton armé traditionnel. Ces matériaux permettent de réaliser des produits plus complexes apportant davantage de fonctions à l'ouvrage.

Selon la recommandation française provisoire sur le BFUP [71], le BFUP est un matériau à matrice cimentaire ayant une résistance caractéristique à la compression dépassant 150 MPa et avec un dosage en fibres suffisant pour atteindre un comportement ductile en traction. Ces propriétés mécaniques distinguent clairement le BFUP des autres types de béton.

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur les paramètres suivants :

- une teneur en eau extrêmement faible (rapport eau/ciment < 0,25 voire 0,20) grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants (de 0,5 à 2% de ciment) qui déflocculent les particules fines.
- une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à quatre classes granulaires : Ciment (comprise entre 700 et 1000 kg/m³), fumée de silice (20 à 30 % de ciment), fibres (2 à 3% en volume) et sable. La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm). Les fibres, composant clé des BFUP, confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section la plus faible possible pour garantir un bon ancrage.

L'optimisation de l'empilement granulaire par l'ajout des fumées de silice permet de diminuer le volume des vides. Ces ultrafines, qui réagissent grâce à leur pouvoir pouzzolanique avec la chaux issue de l'hydratation du ciment, participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz.

La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice, ce qui a pour double conséquence de diminuer la maniabilité du matériau et d'altérer sa compacité.

De manière pratique, une méthode rationnelle de formulation a été mise au point au cours des années 80 [72, 73]. Elle a pour point de départ la méthode Baron-Lesage

[74] de formulation des bétons. Elle a été développée au laboratoire central des ponts et chaussées pour optimiser le squelette granulaire des bétons non fibrés. Cette méthode est fondée sur trois hypothèses principales largement vérifiées par l'expérience :

- pour un rapport Eau/Liant donné, le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire (G+S) le plus compact ;
- l'optimum de compacité (déterminé par la constitution du squelette granulaire : S+G) n'est pas modifié lorsqu'on fait varier les quantités E/L ;
- l'introduction de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

De manière pratique, la méthode se décompose en trois étapes :

- 1) le cahier des charges d'un béton fibré permet généralement de fixer :
 - le rapport eau/liant ;
 - le diamètre du plus gros granulat ;
 - la géométrie et les dimensions de la fibre ;
 - le pourcentage de fibres ;
 - la maniabilité souhaitée ;
- 2) on fait varier le rapport S/S+G et on détermine pour chaque valeur de ce rapport la maniabilité correspondante (en utilisant le maniabilimètre LCL). On trace alors la courbe maniabilité en fonction du rapport S/S+G, et on détermine le rapport optimal qui correspond à la meilleure maniabilité ;
- 3) si la maniabilité correspondant à l'optimum du squelette est différente de la maniabilité fixée par le cahier des charges, il suffit alors soit d'augmenter ou de diminuer le volume de liant, soit d'ajouter un superplastifiant afin de se situer dans un domaine de maniabilité propre à l'utilisation du maniabilimètre LCL (temps d'écoulement de l'ordre de 15 s).

En conclusion, la définition d'une formulation de BHP ou de BFUP, la mieux adaptée possible à une fabrication de produits en béton, est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles en prenant

en compte tous les aspects du ou des problèmes posés (caractéristiques des matières premières, caractéristiques et performances des produits fabriqués, coût...).

La méthode utilisée pour formuler ces deux types de bétons (BHP et BFUP) est indiquée dans la partie « Exploitation et analyse des résultats ».

IV.3 Formulation des bétons autoplaçants

Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Okamura et Ouchi [75, 76] ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon. La méthode développée par O. Petersson et al. [77] vise à trouver la teneur maximale de granulats sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et al. [78] ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par N. Su et al. [79], un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulats et de pâte. Sedran et de Larrard [80] ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire.

Parmi les techniques de formulation les plus répandues on cite alors [81]:

- la méthode basée sur l'optimisation des mortiers ;
- la méthode basée sur l'optimisation de la pâte ;
- la méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire ;
- approche de l'AFGC (Association Française de Génie Civil).

IV.3.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs Japonais [82-91], est, également, nommée Méthode Japonaise.

La méthode repose sur les concepts suivants :

- quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume de grains et le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage.
- volume du sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume total de mortier.
- rapport Eau/Liant et dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-Funnel (fig. 17). Ces essais permettent de calculer deux paramètres :

L'étalement relatif Γ_m et le temps d'écoulement relatif R_m .

$$\Gamma_m = \frac{(D)^2 + (D_0)^2}{(D_0)^2}; \quad R_m = \frac{10}{t}$$

Où D est l'étalement ($D=d_1+d_2/2$), D_0 est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs [92-94] montrent que pour un BAP $\Gamma_m = 5$ et $R_m=1$.

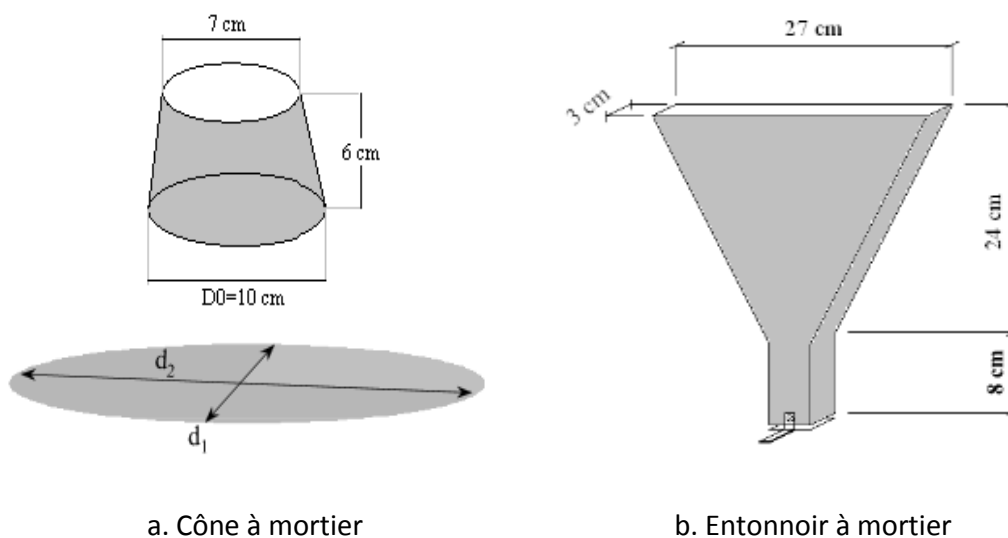


Fig. 17. Dimensions du cône et de l'entonnoir à mortier [91]

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg [29] et Jacobs et al [95] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

À la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al [90] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un

blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

Cette méthode permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont dosés en granulats, surdosés en liant et économiquement peu viables.

De ce fait, plusieurs modifications et différents développements sont apportés à cette méthode. En effet, Edamatsu et al [96] ont réussi grâce à l'utilisation d'additions minérales (fillers calcaires, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux) à augmenter le dosage de sable dans le mortier et à réduire donc le volume de pâte, et particulièrement du ciment, dans le béton.

IV.3.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Cette méthode développée par Tangtermsirikul, Pettersson, Montgomery et Van Bui [78, 97, 98] consiste à minimiser la quantité de la pâte tout en répondant simultanément à deux critères :

- fluidité de la pâte : ce critère conduit à définir un volume minimal de la pâte décrit par :

$$V_{p\grave{a}te_{min}} = 1 - \frac{1 - V_{vides}}{\left(\frac{e_{min}}{D_{moyen}} + 1 \right)^3}$$

Où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats en mm, e_{min} est la distance minimale entre les granulats nécessaire pour fluidifier le béton (elle varie selon les auteurs entre 0,3 et 1 mm).

- introduction d'un volume limite de granulats, V_g , de taille d_i , volume au delà duquel le béton ne s'écoule plus en milieu confiné.

Le volume de pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats. Ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocage de l'écoulement.

Oh et al [99] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al [100] dans une méthode de formulation des bétons de sable.

Une autre méthode de formulation, dite Suédoise, est développée par CBI (Cement och Betong Institutet) [77, 101-103] et se caractérise par la prise en compte des conditions des chantiers. En effet, cette approche est basée sur l'évaluation des risques de blocage des granulats dans les milieux ferraillés. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats. Sa méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de pâte autour des granulats du béton autoplaçant, grâce à une base de données importante de formulations de béton. Cette méthode consiste à déterminer le risque de blocage R_b par la relation :

$$R_b = \sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}}$$

V_i est la proportion volumique des granulats de taille i , par rapport au volume total du béton. $V_{crit,i}$ est la teneur volumique critique de cette fraction granulaire de taille i . La valeur du coefficient du risque de blocage R_b doit être inférieure ou égale à 1 pour obtenir un béton satisfaisant. À partir de cette relation, on peut déduire, pour chaque rapport gravier sur sable (G/S), le volume minimal de pâte pour éviter le risque de blocage, en écrivant $R_b = 1$.

Le rapport E/C de la pâte et le type du ciment sont choisis en fonction de la gamme de résistance visée, le dosage du superplastifiant est optimisé pour obtenir un écoulement autoplaçant caractérisé essentiellement par le cône d'Abrams et la boîte en L.

IV.3.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire

La rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. Forts de cette constatation, les chercheurs du LCPC ont essayé de modéliser le comportement du béton à l'état frais à partir du calcul de la compacité de l'empilement des grains solides (des fines aux gravillons).

Sedran et de Larrard [94, 104-106] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Ce modèle fait intervenir deux notions physiques :

- la compacité virtuelle du mélange, noté γ : compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement des grains qui s'étendent des additions fines aux gravillons. Dans la pratique, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale du mélange, noté C est toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- indice de serrage K : grandeur représentative du degré de compaction d'une classe granulaire. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i on définit un indice de serrage K_i . Plus ce dernier est élevé, plus les contacts entre les grains d'une même classe sont importants.

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{\phi_i}{\phi_i^*}}{1 - \frac{\phi_i}{\phi_i^*}} \right)$$

Avec Φ_i le volume réel de la classe i et Φ_i^* le volume maximum que les grains de cette même classe peuvent occuper, compte tenu de la présence des autres grains.

Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...).

Roshavelov [107] a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade théorique.

IV.3.4 Approches basées sur la recommandation de l'AFGC

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

L'AFGC a mis en place des techniques et des recommandations provisoires pour la caractérisation des BAP à l'état frais qui sont appliquées dans la profession du BTP :

- le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³ (de l'ordre de 40 % du volume total).
- une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage.
- le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1 afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées.
- un diamètre maximal réduit, en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement.
- utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage de saturation) pour obtenir la fluidité souhaitée.
- emploi éventuel d'un agent de viscosité.

IV.4 Discussion et comparaison entre les différentes formulations

Nous avons détaillé les quatre approches de formulations de BAP les plus répandues, ainsi que leur modification ou leur extension. Des auteurs comme Turcry et al [108] ont testé les trois méthodes (la méthode basée sur l'optimisation des mortiers, la méthode basée sur l'optimisation de la pâte et la méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire) et souligné quelques remarques issues des essais qu'ils ont menés. Ils estiment que l'approche LCPC (appuyée par le logiciel développé) donne les résultats les plus satisfaisants. Cependant, cette méthode nécessite l'acquisition de nombreux équipements expérimentaux, d'un logiciel Bétonlab Pro2, et d'outils informatiques. En plus l'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la

compacité du sable et des gravillons, la demande en eau du ciment et des fillers et le dosage à saturation du superplastifiant pour le liant.

La lecture de la littérature ne montre pas si les différentes approches, issues du laboratoire, ont été validées sur le site à partir d'essais en vraie grandeur, afin de mieux appréhender le blocage et la ségrégation.

D'autre part, les auteurs [93, 96] s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

Pour pallier ces exigences nous proposerons une étude de formulation de BAP non coûteuse dans l'AXE 2 « Nouvelles approches pour formuler et analyser rhéologiquement les bétons ». Elle est basée sur les approches récurrentes citées dans la littérature. Les travaux rassemblés dans cette étude répondent à un ensemble de questions: (1) comment évaluer d'une manière simple les performances rhéologiques du béton et de sa compatibilité avec les superplastifiants donnés ? (2) Comment faire pour optimiser l'utilisation des additifs minéraux en faisant un faible rapport E/C dans le béton ?

Afin de comprendre et de traiter les différentes caractéristiques rhéologiques des bétons réalisés nous passerons en revue les propriétés rhéologiques essentielles recherchées ainsi que les différents paramètres qui les contrôlent.

Chapitre 2 : RHEOLOGIE ET RHEOMETRES

La rhéologie est définie comme étant la science qui traite de l'écoulement, des déformations, et plus généralement de la viscosité des matériaux sous l'action des contraintes [116, 117]. La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elles soient liquides ou solides.

L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 [118], avec l'apparition de nouvelles substances aux comportements complexes tels : pâtes, suspensions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de son écoulement alors qu'il est encore à l'état frais. Le béton composé de particules de ciment, de granulats, d'eau et d'air, peut être caractérisé comme des particules solides en suspension (agrégat) dans les fluides visqueux (pâte de ciment).

La caractérisation quantitative des propriétés rhéologiques est importante pour les raisons suivantes: (1) l'ouvrabilité du béton frais constitue un des fondements de la conception de béton (2) le comportement de l'écoulement du béton frais présente des impacts sur la qualité des propriétés du béton durci (3) le placement du béton qui comprend le transport, le pompage, le coulage et la vibration, est affecté par la viscosité plastique et la limite d'élasticité du béton frais.

I. Définitions

I.1 Fluides visqueux

La viscosité d'un fluide, qui est la propriété inverse de la fluidité, est la caractéristique de résistance au glissement ou à la déformation d'un fluide. Ces forces de résistance proviennent du fait que les couches des fluides en mouvement ne peuvent pas glisser indépendamment et librement les unes sur les autres. Ce qui donne naissance à des forces du frottement qui s'opposent directement à l'écoulement.

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimale pour initier l'écoulement d'un matériau ou le stopper. Diverses appellations existent dans la

littérature parmi lesquelles le point de fluage, le seuil de plasticité, le seuil de cisaillement, le seuil de rigidité, la contrainte seuil.

En dessous du seuil de cisaillement, le matériau se comporte comme un solide élastique et ne s'écoule pas.

I.2 Vitesse de cisaillement

Souvent appelé gradient de vitesse, il s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives de matériau cisailé, qui représente donc la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement.

I.3 Comportement de différents liquides

De tels corps montrant un seuil de cisaillement avant écoulement sont non Newtoniens et disent plasto-visco-élastiques. Le caractère non newtonien le plus répandu est la variation de la viscosité avec la vitesse de cisaillement. Ce type de comportement est de loin le plus fréquent. Nous distinguons (fig. 20) :

1. fluides rhéofluidifiants que l'on nomme également pseudoplastiques : la viscosité de ces fluides diminue si la contrainte augmente. C'est le cas des polymères liquides à longue chaîne, des colles et des ciments.
2. fluides rhéoépaississants : ces fluides voient leur viscosité s'accroître lorsque la contrainte augmente. C'est le cas de certains amidons dans l'eau.

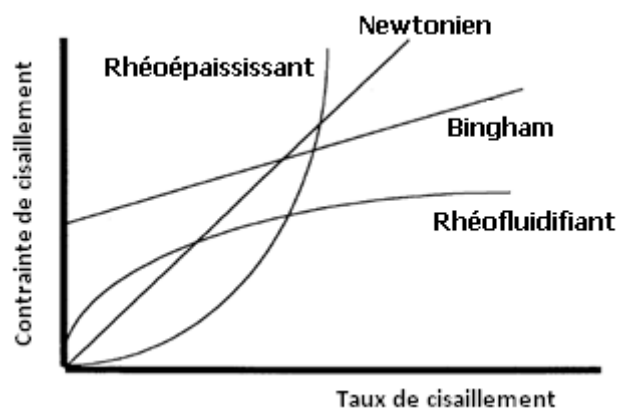


Fig. 20. Courbes de comportement de différents liquides

Pour le cas d'un fluide newtonien, la relation entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement est linéaire et passe par l'origine (fig. 20). L'équation rhéologique d'un corps newtonien s'écrit comme suit : $\eta = \tau / \dot{\gamma}$

Où τ est la contrainte appliquée et $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement (fig. 21).

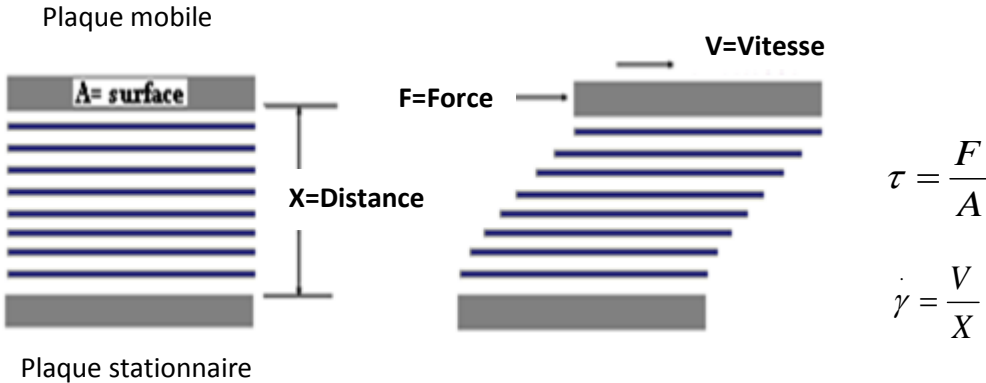


Fig. 21. Fluide modèle

Un cas particulier de comportement non newtonien est le cas du corps de Bingham (fig. 22) lequel présente une relation linéaire entre le taux de cisaillement et la contrainte de cisaillement après avoir franchi le seuil de cisaillement.

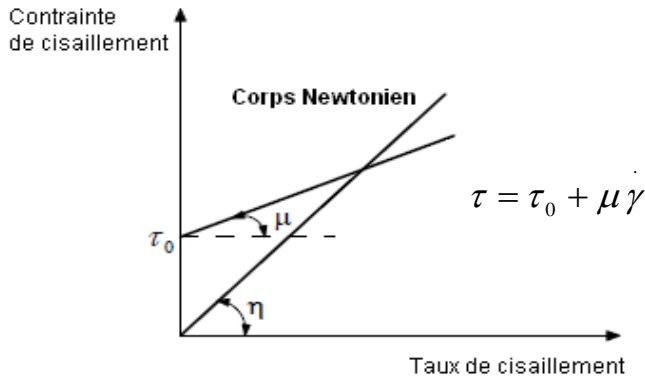


Fig. 22. Rhéogramme du corps Newtonien et de Bingham.

La figure 22 montre que la limite d'élasticité (la contrainte initiale de flux) est le point d'intersection sur l'axe des contraintes de cisaillement. La viscosité plastique est l'angle d'inclinaison de la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement.

Le béton commence à s'écouler quand la contrainte de cisaillement dépasse la limite d'élasticité, une fois cette limite est dépassée, la viscosité plastique assure l'écoulement stable de béton. Il est donc important de mesurer à la fois la limite d'élasticité et la viscosité plastique pour décrire complètement le comportement d'un béton frais.

D'un point de vue physique, les deux paramètres de Bingham ont été interprétés comme suit [104]: le seuil de cisaillement τ_0 est expliqué comme la somme macroscopique de frottements internes des grains solides (fig. 23). Il dépend directement du nombre et de la nature des contacts entre les grains et donc de la compacité du squelette granulaire. Au-delà du seuil, la contrainte appliquée au mélange entraîne l'écoulement qui se traduit par des mouvements relatifs entre les grains solides (le frottement) et la circulation de la phase liquide dans la porosité intergrains. C'est cette dernière qui causerait la dissipation visqueuse dans le liquide en écoulement et expliquerait le deuxième terme $\mu\dot{\gamma}$ dans la loi de Bingham. Plus la circulation est difficile, plus le paramètre μ est important.

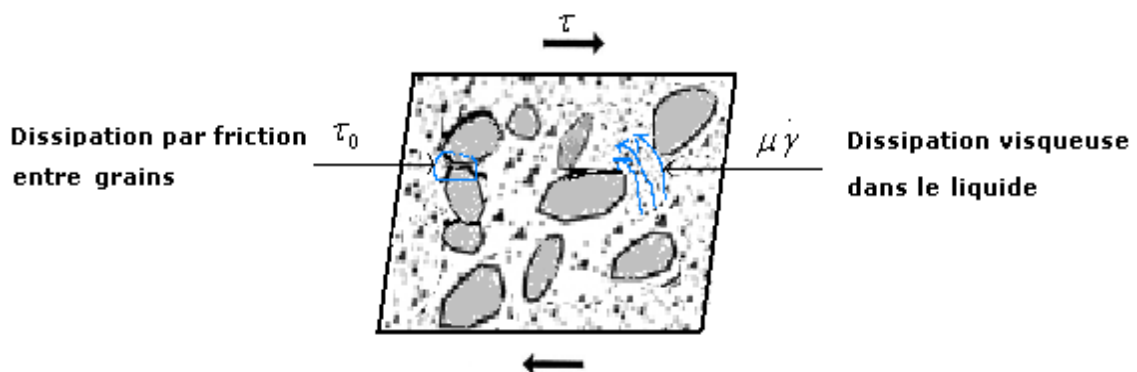


Fig. 23. Interprétation physique du modèle de Bingham

La plupart des équations utilisées pour les suspensions concentrées, comme le béton, essaient de relier la concentration de la suspension de la viscosité ou de la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement. Les tableaux 1 et 2 donnent les équations les plus couramment utilisés dans les deux approches.

Tableau 1. Modèles rhéologiques de la viscosité

Modèle de viscosité	Equation	Hypothèses
Einstein [119]	$\eta = \eta_0(1 + [\eta]\Phi)$	Pas d'interaction en particules, Suspension diluée
Roscoe [120]	$\eta = \eta_0(1 - 0.35\Phi)^{-K}$	Interaction entre particules
Kikukawa – Murata 1992 [121]	$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}\right)^{-K}$	Mélange est constitué de deux phases : solvant et soluté
Ferraris et de Larrard 1998 [122]	$\eta = \text{Exp} \left[26.75 \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\max}} - 0.7448 \right) \right]$	Béton, modèle de Bingham
Krieger-Dougherty [123]	$\eta / \eta_0 = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{\max}} \right) - [\eta] \Phi_{\max}$	Relation entre la viscosité et la fraction volumique solide maximale (packing)
Mooney [124]	$\eta / \eta_0 = \exp \left(\frac{[\eta] \Phi}{1 - \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}} \right)$	Prend en compte la fraction volumique solide maximale
Eiler 1943 [125]	$\eta / \eta_0 = \left(1 + \frac{1.25\Phi}{1 - \Phi_{\max}} \right)^2$	Suspensions concentrées, Particules sphériques
Chong et al 1971 [126]	$\eta / \eta_0 = \left(1 + 0.75 \cdot \frac{\frac{\Phi}{\Phi_{\max}}}{1 - \frac{\Phi}{\Phi_{\max}}} \right)^2$	Équation empirique Suspensions concentrées et polydisperses

Définitions des variables

η = Viscosité de suspension; Φ = Fraction volumique solide

Φ_{\max} = Fraction volumique solide maximale

η_0 = la viscosité de la phase fluide du milieu; K = Constante

$[\eta]$ = viscosité intrinsèque de la suspension

Plusieurs chercheurs ont tenté de quantifier la viscosité plastique du béton frais en fonction de sa composition, en particulier le travail de Roshavelov [127] et Ferrari et de Larrard [122]. Mais d'une manière générale, deux approches ont été avancées pour la modélisation de la viscosité plastique du béton frais : les modèles phénoménologiques et les modèles fondamentaux. Les modèles phénoménologiques sont fondés sur des observations. Le modèle le plus prometteur dans cette catégorie pour le béton frais est celui proposé par Ferraris et de Larrard [122]. Ils ont trouvé que la viscosité plastique est exprimée en fonction, uniquement, de compacité maximale de l'ensemble du mélange (ϕ_{\max}). Pour estimer la viscosité plastique du béton frais, ils ont développé le modèle présenté dans le tableau 10.

L'utilité de ces modèles phénoménologiques est limitée par les données expérimentales. Par conséquent, l'utilisation du modèle de Ferrari et de Larrard peut conduire à des prédictions erronées si les limites du modèle, à savoir, ϕ et ϕ_{\max} n'ont pas été définis.

Les modèles fondamentaux proposés pour quantifier la viscosité plastique sont basés sur la rhéologie et la mécanique de fluides. Ils sont proposés pour quantifier la viscosité plastique des suspensions concentrées dans un solvant. Une liste complète de ces modèles est donnée dans le tableau 1.

Les équations du tableau 1 sont utilisées pour décrire l'écoulement de pâte de ciment, mais elles ne sont pas applicables au béton en raison de la complexité de la suspension (sauf le modèle de Ferrari et de Larrard). Le tableau 2 donne les équations couramment utilisées pour le béton. Ces équations intègrent un second facteur : la limite d'élasticité (seuil de cisaillement).

Tableau 2. Les équations relatives de contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement

Modèle	Equation
Newtonien [128]	$\tau = \mu \dot{\gamma}$
Bingham [129]	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$
Herschel et Bulkley [130]	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Vom Berg [131], Ostwald- de Waele [132]	$\tau = \tau_0 + B.\sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Eyring [133]	$\tau = a \dot{\gamma} + B.\sinh^{-1}(\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff [134]	$\tau = a.(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni et al. [135]	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$
Casson [136]	$(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0})^2 = a.(\dot{\gamma})$
De Kee [137]	$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} e^{-A \dot{\gamma}}$
Quemada [119]	$\tau = \left(\frac{1 + \sqrt{(A \dot{\gamma})}}{B + C \sqrt{(A \dot{\gamma})}} \right)^2 \dot{\gamma}$
Yahia et Khayat [138]	$\tau = \tau_0 + 2\sqrt{\tau_0 \mu \dot{\gamma} e^{-A \dot{\gamma}}}$

Définitions des variables

μ = Viscosité; τ = Contrainte de cisaillement; τ_0 = Seuil de cisaillement; $\dot{\gamma}$ = Taux de cisaillement

$K, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$ = Constantes

La figure 20 montre quelques types de courbes qui peuvent être obtenues lorsque la contrainte de cisaillement est tracée en fonction du taux de cisaillement. Toutes les courbes représentées peuvent être décrites par des équations du tableau 2.

Selon de Larrard [122], le béton frais est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules. Hu [128] a ainsi montré que pour les bétons dont l'affaissement est supérieur à 10 cm et les conditions de stabilité (absence de ségrégation) sont respectées, le béton frais peut être assimilé à un fluide du type Herschel-Bulkley dont la loi fondamentale gouvernant le comportement rhéologique est décrite dans [130] (voir le tableau 2).

Les propriétés rhéologiques du béton frais sont essentielles pour l'industrie du béton, car elles affectent le placement et la maniabilité. Par ailleurs, ces propriétés rhéologiques influent sur la productivité et la qualité du béton y compris les propriétés mécaniques et la durabilité.

En outre, pour évaluer la viscosité des bétons fluides plusieurs essais normalisés sont recommandés. Afin de comprendre leurs objectifs et principes, la partie suivante décrit les essais rhéologiques ainsi que les domaines d'application.

II. Caractérisation des bétons à l'état frais

La plupart des formulations des bétons fluides sont conçues actuellement de manière empirique et cependant on doit concilier deux caractéristiques a priori contradictoires la fluidité et la ségrégation. Par conséquent ces bétons doivent satisfaire plusieurs tests qui sont recommandés par l'AFGC [12], qui permettent de caractériser les principales propriétés du béton à l'état frais (la fluidité et la stabilité statique et dynamique, en milieu libre et confiné) : l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la stabilité au tamis et le V-Funnel. Le gâchage des bétons et les essais de caractérisation ont été effectués selon les procédures décrites par l'AFGC dont les valeurs limites sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs préconisées pour les essais [12]

Essais	étalement	Stabilité au tamis	L-Box (H2/H1)	V-Funnel
Valeurs limites	60 à 75 cm	≤ 15%	> 0,8	8 à 14 sec

Les exigences de la spécification, de la performance et de la conformité pour le béton structural sont données dans les normes EN 206-1. Toutefois, dans le cas du BAP certaines propriétés à l'état frais dépassent les limites et les classes fournies dans la présente norme.

La capacité de remplissage et la stabilité du béton autoplçant à l'état frais peuvent être définies par quatre caractéristiques principales. Chaque caractéristique peut être déterminée par une ou plusieurs méthodes d'essai :

Caractéristiques	Méthode d'essai (s)
Fluidité	<i>Étalement au cône d'Abrams</i>
Viscosité (évaluée par le taux d'écoulement)	<i>Temps t_{500} d'essai d'étalement ou Ecoulement en V-Funnel</i>
Capacité de remplissage	<i>Boite en L</i>
Ségrégation statique	<i>Stabilité au tamis</i>

II.1. Caractérisation empirique : fluidité & viscosité

II.1.1 Fluidité

L'essai d'étalement est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique (norme NF EN 206). L'affaissement des bétons autoplçants étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après l'étalement réalisé. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle. Il est basé sur l'essai d'affaissement décrit dans la norme EN 12350-2.

Cet essai est simple à réaliser et ne demande qu'une faible quantité de matériaux. Il peut donc être utilisé aussi bien en laboratoire que sur site.

L'étalement de béton autoplçant décrit la fluidité à l'état frais de mélange dans des conditions non confinées. Les observations visuelles pendant l'essai et / ou la mesure du temps t_{500} peuvent donner des informations supplémentaires sur la résistance à la ségrégation et l'uniformité de chaque formulation (fig. 24).



Fig. 24. Comportement rhéologique de béton fibré à l'état frais.

Les éléments suivants sont typiques pour une gamme d'applications:

Classe	Etalement en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

- SF1 (550 - 650 mm) est approprié pour :
 - structures en béton non ou légèrement armées, bétonnées par le haut, avec un libre déplacement du point de coulage (ex. : dalles de logement) ;
 - bétonnage par un système de pompe à injection (ex. : revêtements de tunnels);
 - sections suffisamment petites pour empêcher la grande longueur d'écoulement horizontal (ex.: pieux et certaines fondations profondes).

- SF2 (660 - 750 mm) convient à de nombreuses applications courantes (ex. : voiles, poteaux, etc.)

- SF3 (760 - 850 mm) est généralement produit avec une taille maximale des agrégats de moins de 16 mm et est utilisé pour des applications verticales dans des structures très congestionnées ou de formes complexes.

SF3 donnera souvent une meilleure finition de surface que les SF2 pour des applications normales, mais la résistance à la ségrégation est plus difficile à contrôler.

II.1.2 Viscosité

La viscosité peut être évaluée par le temps t_{500} pendant l'essai d'étalement ou évaluée par le temps d'écoulement en V-Funnel. La valeur du temps obtenue ne mesure pas la viscosité du béton, mais donne une indication sur la vitesse d'écoulement. Un béton avec une faible viscosité aura un débit initial très rapide.

La viscosité (faible ou élevée) devrait être spécifiée dans des cas particuliers tels que ceux donnés ci-dessous. Il peut être utile pour mesurer et enregistrer le temps t_{500} tout en faisant le test d'étalement comme un moyen de confirmer l'uniformité du béton autoplaçant :

Classe	t_{500} (en s)	Temps V-Funnel (en s)
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8
VS2/VF2	> 2	9 à 25

- VS1/VF1 a une bonne capacité de remplissage, même avec un renforcement congestionné. Il a généralement une meilleure finition de surface. Toutefois, il est plus susceptible de présenter du ressuage et de la ségrégation.
- VS2/VF2 n'a pas de classe de limite supérieure, mais avec le temps d'écoulement plus grand, il est plus susceptible de présenter des effets thixotropiques, qui peuvent être utile pour améliorer la résistance à la ségrégation. Les effets négatifs peuvent être signalés au sujet de surface et aux arrêts ou des retards entre les couches successives.

II.1.3 Principe de l'essai d'étalement au cône d'Abrams

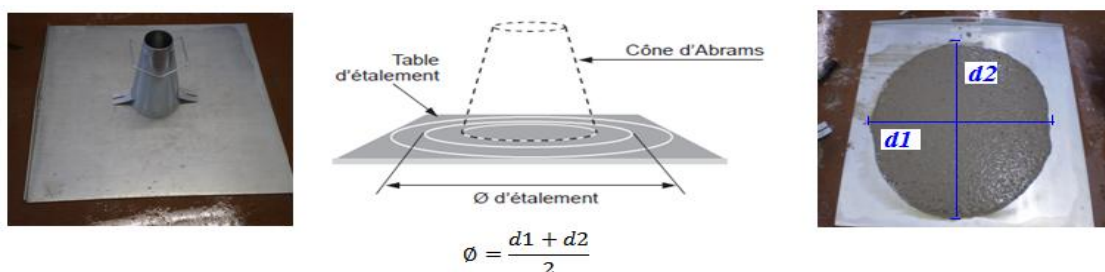


Fig. 25. Procédure d'essai d'étalement

Le béton frais est déversé dans un cône comme celui utilisé dans l'essai d'affaissement décrit dans EN 12350-2 (fig. 25). Lorsque le cône est retiré vers le

haut le temps de début du mouvement vers le haut du cône et le moment où le béton atteint un diamètre de 500 mm est mesuré (fig. 26); c'est le temps T500 rapporté à 0,5 s près. Le plus grand diamètre d'étalement du béton et le diamètre de l'étalement perpendiculaire sont ensuite mesurés, l'étalement SF étant le diamètre moyen exprimé à 10 mm près.

$$SF = \frac{(D_1 + D_2)}{2}$$

SF est l'étalement, en millimètres ;

D1 est le plus grand diamètre d'étalement, en millimètres ;

D2 est l'étalement à un angle de 90° par rapport à d1, en millimètres.

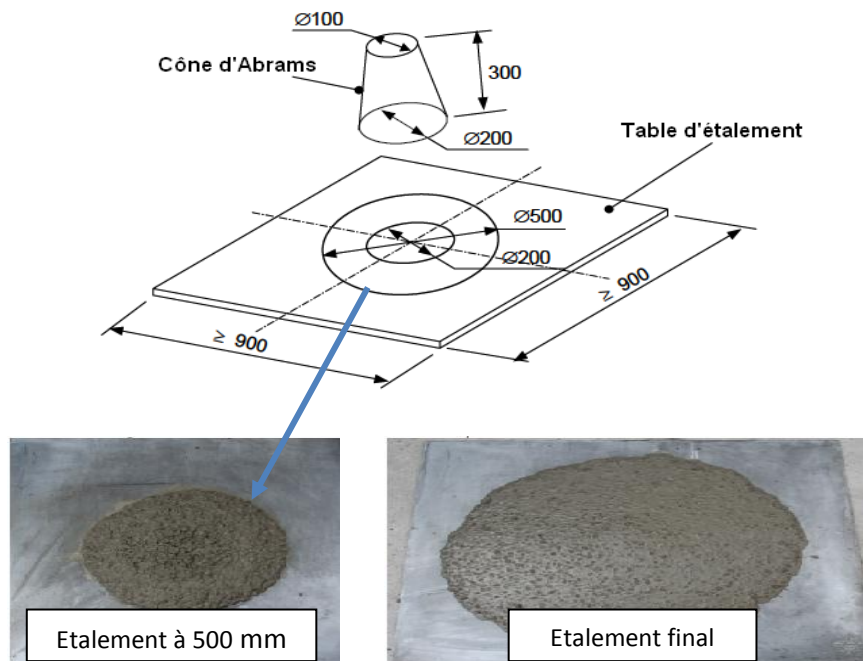


Figure 26. Caractérisation rhéologique des bétons autoplaçants

Toute composition dont l'étalement est inférieur à 60 cm est écartée afin d'assurer une reproductibilité entre les différentes gâchées (fig. 27).

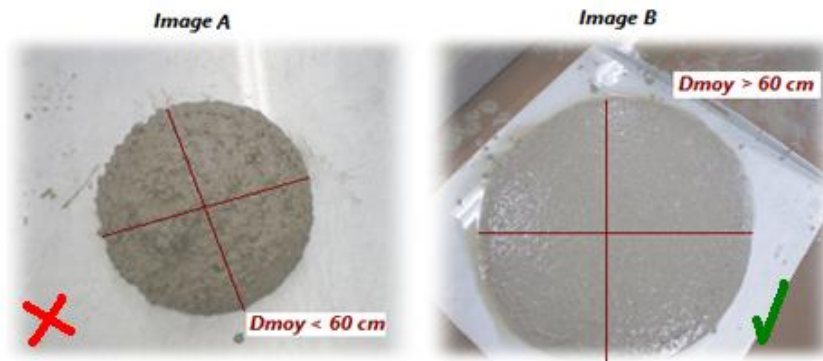


Fig. 27 : Exemple de validité de l'essai d'étalement

II.1.4 Principe de l'essai V-FUNNEL



Fig. 28. Essai V-Funnel

Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de 12 litres de béton passant à travers une ouverture étroite (fig. 28). Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante.

Le temps (en seconde) nécessaire au béton pour s'écouler de cet entonnoir est mesuré et enregistré comme le temps d'écoulement du V-Funnel [EN 12350-1].

II.2 Capacité de remplissage

Un béton autoplaçant doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, au travers de zones confinées (dans un coffrage très ferrailé) et une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante pour cela. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier (cf. figure 29) et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines, et interrompre l'écoulement. Il faut donc qu'un béton

autoplaçant présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée [94].

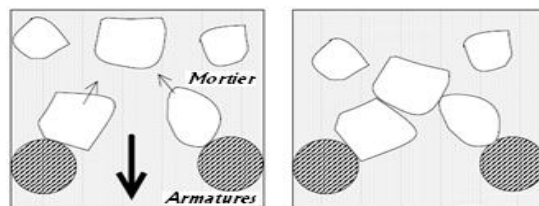


Fig. 29. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle

Différents essais sont disponibles pour mettre en évidence la capacité d'un BAP à s'écouler à travers un ferrailage plus ou moins dense. Dans notre laboratoire, on a utilisé l'essai à la boîte en L.

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

L'aptitude à l'écoulement décrit la capacité du mélange à s'écouler à travers les espaces confinés et les ouvertures étroites sans perte d'homogénéité. Dans la définition de la capacité de passage, il est nécessaire de considérer la géométrie et la densité de l'armature, la fluidité / capacité de remplissage et la taille maximale des granulats.

Des exemples de spécifications sont donnés ci-dessous :

Classe	capacité de passage
PA1	≥ 0,80 avec 2 barres
PA2	≥ 0,80 avec 3 barres

La dimension déterminante est la plus petite maille d'armature à travers laquelle le béton doit s'écouler de manière continue pour remplir le coffrage. Cette dimension est appelée « intervalle d'écoulement » qui représente la plus petite maille d'armature à travers laquelle le BAP doit s'écouler de manière continue pour remplir le coffrage.

- PL1 : structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 80 mm et 100 mm, (ex. : structures verticales d'habitation).
- PL 2 : structures avec un intervalle d'écoulement compris entre 60 mm et 80 mm, (ex. : ouvrage de génie civil).

Pour les dalles minces où l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm et pour les autres structures où l'intervalle d'écoulement est supérieur à 100 mm, aucune aptitude à l'écoulement spécifique n'est requise.

Pour des structures complexes avec un intervalle d'écoulement inférieur à 60 mm, des essais spécifiques peuvent se révéler nécessaires.

II.2.1 Principe de l'essai à la boîte en L

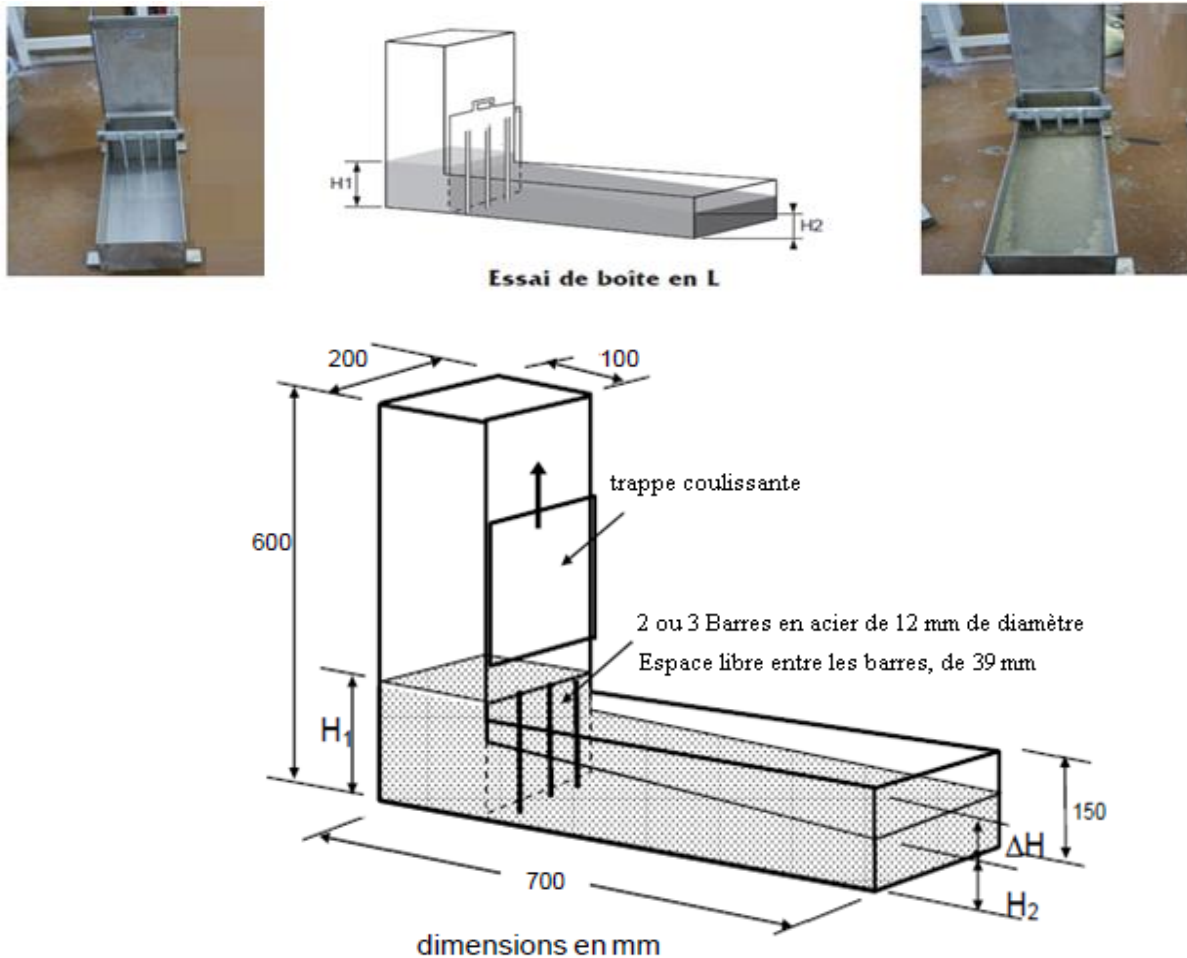


Fig. 30. Procédure d'essai de la Boîte en L

Un échantillon d'environ 13 litres de béton frais s'écoule horizontalement à travers les écarts entre les barres verticales. Lorsque le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs du niveau de béton dans la partie verticale (H_1) et à l'extrémité de la partie horizontale (H_2) selon les normes EN 12350-1 (fig.30).

La capacité d'écoulement ou de blocage PA est calculée à partir du rapport $PA = H_2/H_1$.

Toute composition dont le rapport $H2/H1$ est inférieur à 0.8 est écartée afin d'assurer une reproductibilité entre les différentes gâchées (fig. 31).



Fig. 31. Exemple de validité de l'essai de boîte en L

Il existe deux variantes: le test avec deux barres et le test avec trois barres. L'essai à trois barres simule un plus fort pourcentage d'armatures.

La ségrégation dynamique est une séparation entre les granulats et la phase suspendante lors de l'écoulement. Certaines précautions de formulation, telles que la réduction du diamètre maximal des granulats, permettent de limiter les risques de blocage au droit des armatures. Cette ségrégation dépend principalement de la viscosité du matériau qui permet d'entraîner correctement les granulats lors de l'écoulement.

Il apparaît donc que le risque de blocage, pour un ferrailage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Jin [93] a calculé, dans le cas d'un ferrailage unidirectionnel (ferrailage vertical uniquement), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue (fig. 32) :

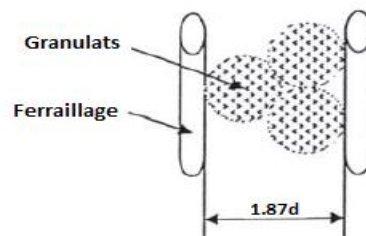


Fig. 32. Critère de blocage et géométrie du calcul

$$e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)d \text{ Avec } d : \text{diamètre maximal des granulats}$$

D'après ce critère, si le diamètre maximal des granulats est de 20 mm et dans le cas d'un ferrailage vertical, l'espacement doit être supérieur à 37,3 mm. On peut remarquer que cette valeur est du même l'ordre de grandeur que l'espacement utilisé dans le cas de la Boite en L.

Afin de limiter le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats doit donc être réduit par rapport à celui d'un béton traditionnel. D'après l'AFGC [12], le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Le choix d'un diamètre maximal plus important est possible mais ne se justifie que lorsque le confinement et la densité du ferrailage sont faibles.

Cependant, l'absence de ségrégation dynamique lors d'un essai à la Boite en L ne suffit pas à garantir l'homogénéité des propriétés finales du matériau. Une instabilité du matériau peut également s'opérer lors de la phase de repos précédant la prise. Cette ségrégation statique est présentée par la suite.

II.3 Ségrégation statique

Pour l'étude du phénomène de ségrégation statique, on suppose que le matériau s'est correctement mis en place (absence de ségrégation dynamique) et que seule une ségrégation des gros granulats sous l'effet des forces de pesanteur peut apparaître.

La ségrégation statique n'est pas décelable en surface (sauf si elle s'accompagne de ressuage). Il est donc nécessaire de l'appréhender en amont du coulage. Les essais permettant de mettre en évidence et de mesurer la ségrégation statique sur béton frais seront tout d'abord présentés. Des études portant sur la compréhension des mécanismes du phénomène seront ensuite abordées. Nous verrons qu'elles restent limitées mais qu'elles ouvrent cependant quelques pistes de recherche.

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité in situ du béton. Les bétons peuvent présenter de ségrégation lors et après le coulage. La séparation qui survient après le bétonnage sera plus nuisible dans les hauts éléments, elle peut conduire à des défauts de surface tels que la fissuration...

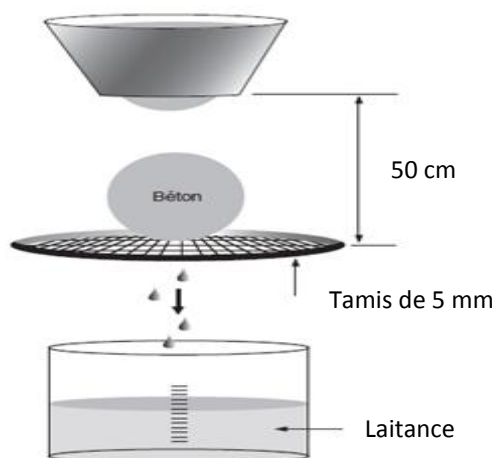
En l'absence d'expérience pertinente, les conseils généraux suivants sur les classes de résistance à la ségrégation mesurée par l'essai de stabilité au tamis sont donnés: si les classes d'étalement sont hautes et/ou la classe de viscosité est faible, la résistance à la ségrégation devient un paramètre très important. Si aucune de ces situations ne s'applique, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier une classe de résistance à la ségrégation.

Classe	Résistance à la ségrégation %
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

- SR1 est généralement applicable pour les dalles minces et pour les applications verticales avec une distance d'écoulement de moins de 5 mètres et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.
- SR2 est préféré dans des applications verticales si la distance d'écoulement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm, afin de prendre soin de la ségrégation lors de l'écoulement.

SR2 peut également être utilisé pour des applications verticales avec un intervalle d'écoulement de moins de 80 mm si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 mètres, mais si la hauteur de chute est supérieure à 5 mètres, une valeur cible de SR de moins de 10% est recommandée.

II.3.1 Principe de l'essai de stabilité au tamis



Essai au tamis

Fig. 33. Procédure d'essai de la stabilité au tamis

Après prélèvement, le béton frais est laissé au repos pendant 15 min et toute remontée d'eau de ressuage est notée. La partie supérieure de l'échantillon ($4,8 \pm 0,2$ Kg) est ensuite versée dans un tamis des ouvertures carrées de 5 mm. Après 2 min, le poids du matériau qui a traversé le tamis est enregistré (fig. 33). Le ratio de ségrégation est alors calculé comme la proportion de l'échantillon passant à travers le tamis. Le pourcentage de laitance SR est calculé à partir de l'équation suivante et consigné au 1% près :

$$SR = \frac{(m_{ps} - m_p) \times 100}{m_c}$$

Où

SR est la laitance en pourcentage;

m_{ps} est la masse du fond de tamis plus masse de la laitance écoulée, en grammes;

m_p est la masse du fond du tamis, en grammes;

m_c est la masse initiale du béton placé sur le tamis, en grammes.

Toute composition dont le pourcentage de laitance SR est supérieur à 30 % est écartée afin d'assurer une reproductibilité entre les différentes gâchées (fig. 34).

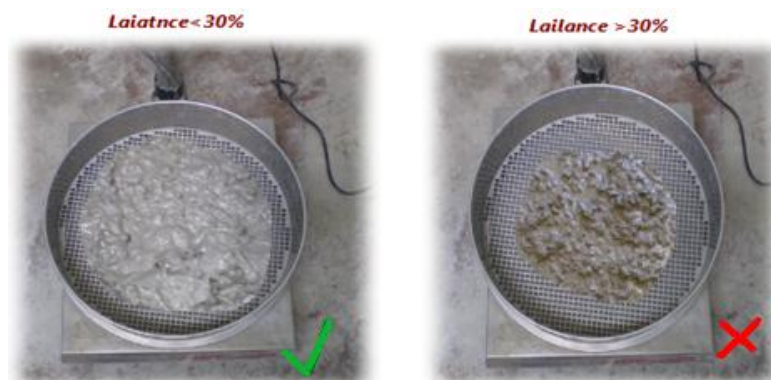


Figure 34 : Exemple de validité de l'essai de stabilité au tamis

L'appréciation de la ségrégation statique peut être effectuée en se basant sur les résultats de l'essai de stabilité au tamis. Plus le béton est stable « pâte visqueuse et cohésive » plus le risque de la ségrégation statique est moindre. Toutefois, cette manière de procéder reste une appréciation indirecte de la ségrégation statique.

II.3 Teneur en air occlus

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais, on utilise la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton [139]. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française NF P 18-353 [140].

II.3.1 Essai Aéromètre à béton

Il permet la détermination de la teneur en air globale sur béton frais à l'aide d'un instrument portatif relativement simple.

L'aéromètre est constitué d'une cuve d'une capacité de 5 litres recevant l'échantillon de béton et d'un couvercle rigide muni d'un tube vertical en verre gradué. L'ensemble couvercle-cuve est fixé par un mécanisme étanche et le tout est rempli d'eau jusqu'au niveau zéro (fig. 35).

L'essai consiste à appliquer une pression sur l'échantillon en utilisant une pompe à air installée en partie supérieure du tube. Cette pression provoque une réduction de volume du béton par la compression des vides d'airs (le reste étant supposé incompressible). La teneur en air peut être estimée à partir de la différence de volume.



Figure 35 : Aéromètre à béton

Cet essai a l'avantage d'être rapide et peut donc donner le volume total d'air dans le béton frais juste après la fin du malaxage.

Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécaniques de notre béton [139].

En résumé, cette partie a été consacrée aux différents essais et techniques de caractérisation des bétons fluides, essentiellement à l'état frais, en mettant l'accent sur le travail qui a été fait au niveau européen ce qui a constitué le guide Européen pour les bétons autoplaçants.

Lors de la fabrication du béton on s'efforce d'ajuster sa fluidité et sa viscosité de manière à permettre une mise en œuvre optimale. L'approche la plus adoptée pour quantifier ces propriétés rhéologiques est de mesurer expérimentalement la contrainte de cisaillement par rapport au taux de contrainte de cisaillement en utilisant un rhéomètre béton.

III. Rhéomètres

Les mesures réalisées sur bétons [122, 128, 141] montrent que ces matériaux ne sont pas des fluides newtoniens, mais qu'ils présentent un comportement viscoplastique. Les propriétés d'écoulement de béton peuvent souvent être décrites approximativement en utilisant un modèle de Bingham, définie par deux facteurs, la viscosité plastique et le seuil d'écoulement. Les tests empiriques les plus couramment utilisés (Essai d'étalement, la boîte en L, V-Funnel...) [11, 12] sont insatisfaisants car ils mesurent un seul paramètre qui n'est pas suffisant pour caractériser complètement la rhéologie du béton. La figure 36 montre comment deux bétons pourraient avoir un paramètre identique et un second paramètre très différent. Ces bétons peuvent être très différents dans leurs comportements d'écoulement. Par conséquent, il est important d'utiliser un test qui va décrire l'écoulement du béton, par la mesure (au moins) de deux facteurs.

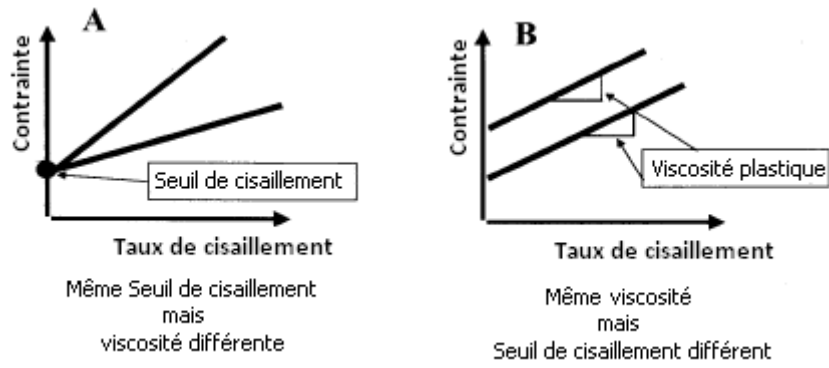


Fig. 36. Comportement rhéologique de bétons

Les rhéomètres permettent d'obtenir des rhéogrammes qui décrivent la relation entre le couple appliqué à un échantillon représentatif et la vitesse de rotation de la pièce mobile.

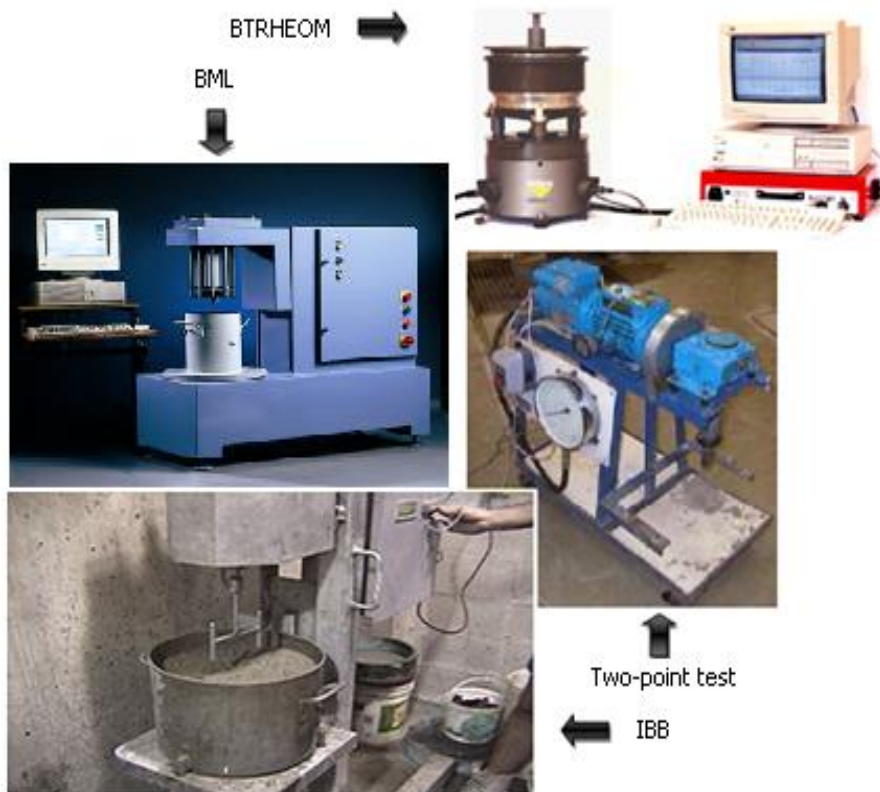


Fig. 37. Rhéomètres développés pour les bétons

La figure 38 présente les différentes géométries de palettes utilisées dans les rhéomètres béton.

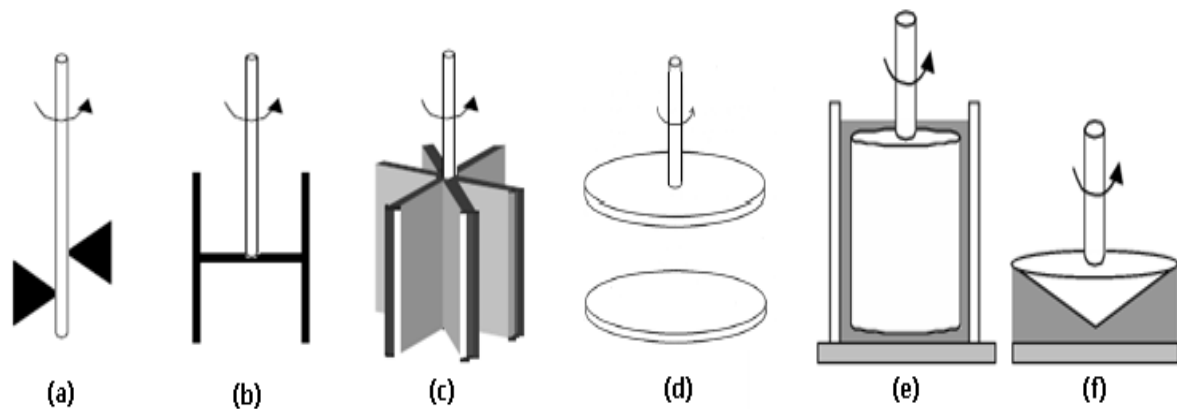


Fig. 38. Différentes géométries de palettes utilisées dans les rhéomètres béton : (a) two point test de Tattersall, (b) IBB, (c) BML, (d), (e) et (f) BTRHEOM.

Les rhéomètres à béton ont fait l'objet ces vingt dernières années de nombreux développements. À savoir :

- Two-point test [rhéomètre de Tattersall], premier rhéomètre rotationnel disponible dans le commerce pour le béton. Il s'agit de la première tentative pour mesurer la contrainte induite à différents taux de cisaillement. Il se compose d'un cylindre creux rempli de béton et d'une ailette, illustré à la figure 38 (a), qui tourne à une vitesse contrôlée. Le couple généré au cours de la rotation est mesuré. Cet appareil est conçu pour les bétons de grandes maniabilités (affaissements supérieurs à 75 mm au cône d'Abrams) [142].
- IBB est un rhéomètre rotatif. Il est dérivé de two-point test. Le principe de fonctionnement est identique. Il est constitué d'un agitateur en forme de H qui peut tourner en mouvement planétaire ou axial dans une cuve cylindrique fixe. Voir la figure 38 (b). Initialement conçu pour les bétons projetés par voie humide, l'IBB a été testé avec succès dans une large gamme de béton allant des bétons d'affaissement de 20 mm au cône d'Abrams, aux BAP, aux bétons hautes performances (BHP), aux bétons pompés, aux bétons de fibres, etc [143].
- BML est un rhéomètre rotatif [144]. Il est dérivé de l'appareil Two-point test. Le principe de fonctionnement est identique, mais la forme d'ailette a été modifiée par Wallevik et Gjørsv. L'ailette est présentée dans la figure 38 (c). C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux. Le cylindre intérieur est fixe tandis que le cylindre

extérieur tourne autour de l'axe à une vitesse angulaire fixe. Les cylindres sont munis de redans parallèles à leur axe.

- BTRHEOM est un rhéomètre de plaques parallèles [145]. Pour chaque essai, un échantillon de béton ayant la forme d'un cylindre creux est cisailé entre deux plans horizontaux. Le plan inférieur est fixe tandis que le plan supérieur est en rotation autour d'un axe vertical avec une vitesse angulaire. Voir la figure 38 (d). Cet appareil est destiné à la mesure des propriétés rhéologiques des bétons d'affaissements au cône d'Abrams supérieurs à 100 mm, des bétons autoplaçants avec des granulats de diamètres inférieurs à 25 mm en présence ou non de vibration [128, 143]. Il existe d'autres géomètres de l'agitateur utilisé par le BTRHEOM, c'est le cas de cylindre concentrique (fig. 38 (e)) et de cône et plaque (fig. 38. (f)).

C'est la connaissance a priori du champ de vitesses théoriques dans les rhéomètres plan-plan ou du champ de contraintes dans les rhéomètres à cylindres coaxiaux qui permet de remonter à la loi de comportement du béton et donc au seuil et à la viscosité.

Des campagnes expérimentales portant sur la caractérisation des bétons frais, de propriétés rhéologiques différentes ont été menées en France [146] et aux Etats-Unis [147] avec les rhéomètres précités : BML, BTRheom, IBB, Two-point test. Leurs propriétés rhéologiques ont été mesurées de façon simultanée et ont ensuite été comparées. L'application du modèle de Bingham aux différents rhéogrammes a montré que ces rhéomètres ne donnent pas la même valeur absolue des paramètres physiques mesurés (seuil de cisaillement, viscosité plastique). Dans les figures 39, 40, 41 et 42, on présente un examen des corrélations entre les rhéomètres pour quantifier le seuil de cisaillement et la viscosité plastique [147].

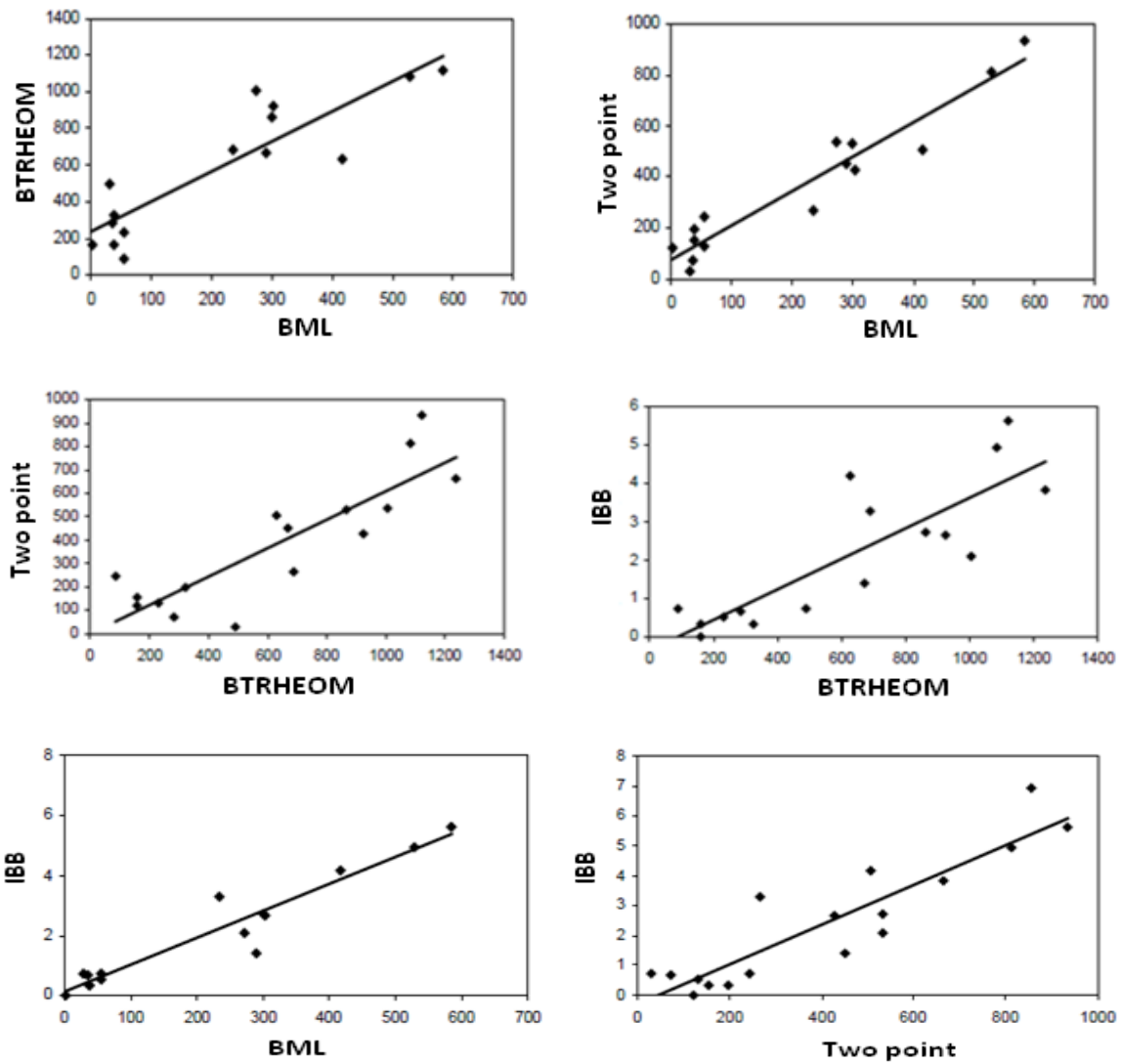


Fig. 39. Corrélation Seuil de cisailment (Pa)

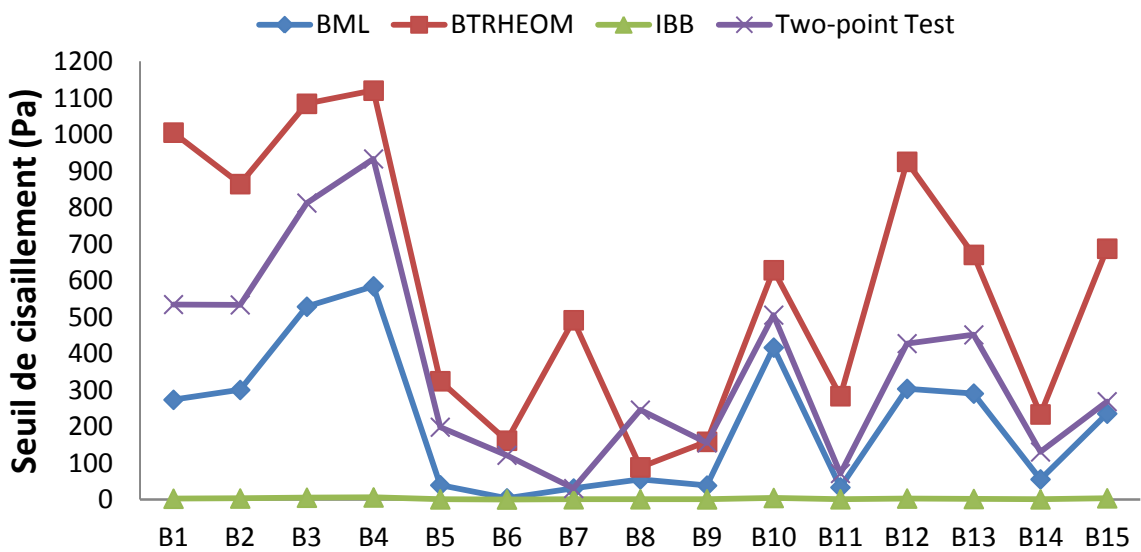


Fig. 40. Comparaison des seuils de cisailment mesuré avec les rhéomètres.

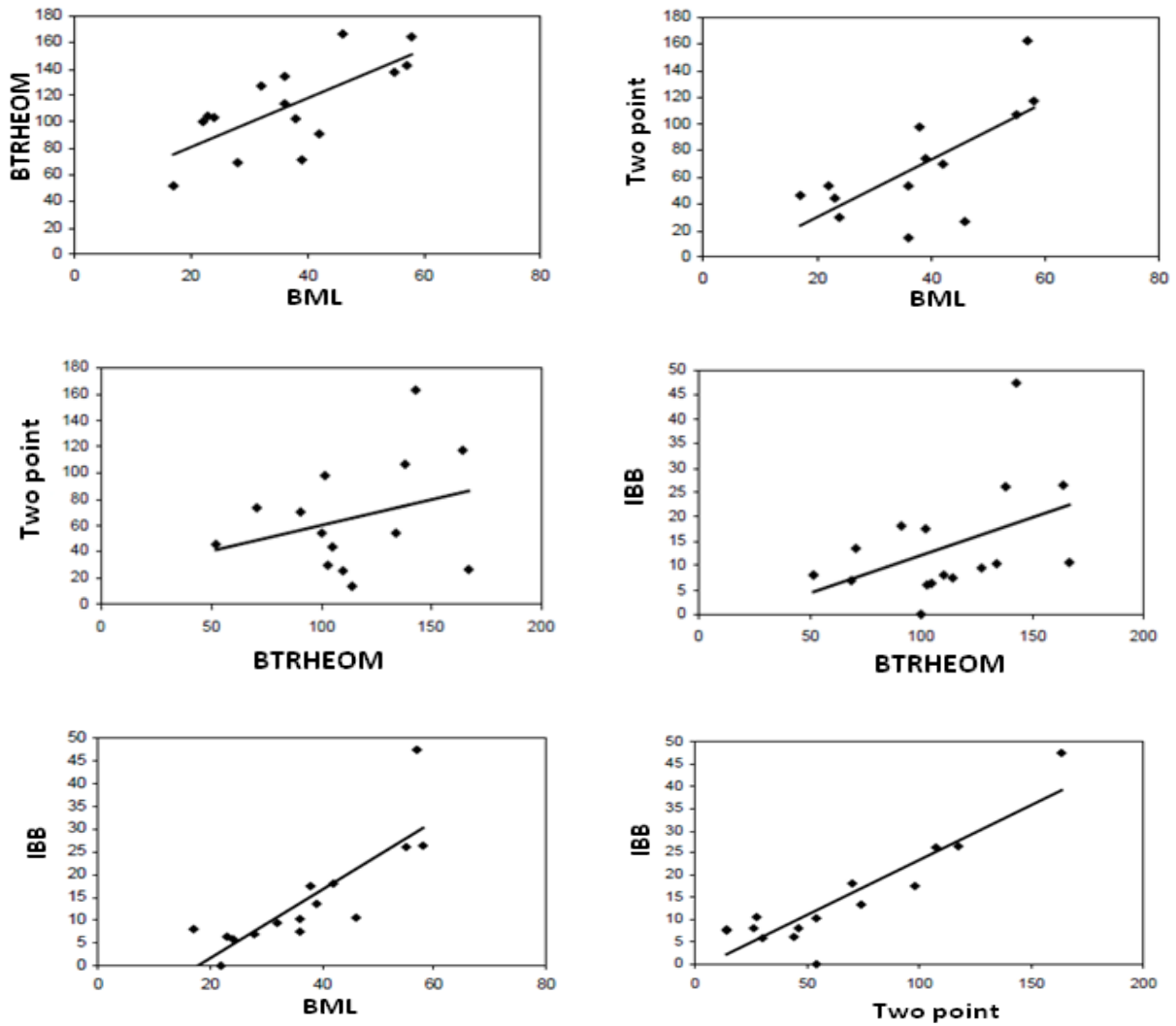


Fig. 41. Corrélation Viscosité plastique (Pa.s)

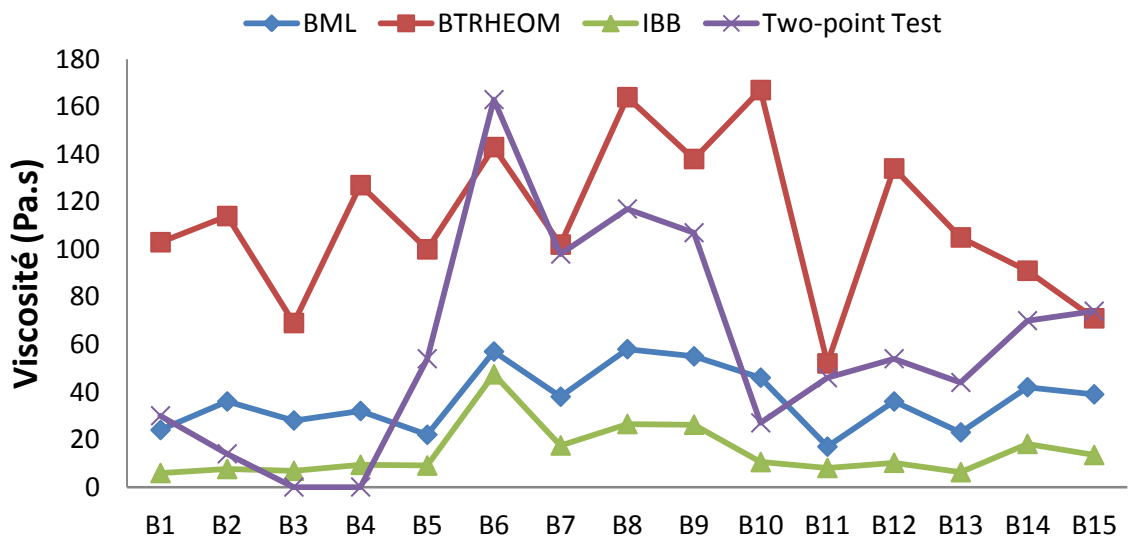


Fig. 42. Comparaison des viscosités plastiques mesurées par les rhéomètres.

Les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique dépendent fortement du type d'appareils et de la géométrie utilisée. Comme le montrent les figures 40 et 42, les différents appareils ne permettent pas d'identifier une courbe d'écoulement unique et caractéristique pour chaque béton testé.

Cependant quelle que soit l'approche employée les propriétés des bétons autoplaçants se différencient notablement des celles des bétons traditionnels. D'une part, l'affaissement n'est plus mesurable puisqu'il est total, on parle donc d'étalement des BAP [148]. D'autre part, malgré le fait que la réalisation d'essais rhéologiques est difficile, et que le choix d'un modèle adapté est encore discuté, les différentes données indiquent que la valeur du seuil d'écoulement des BAP est bien plus faible que celui des autres bétons [94, 149].

Le tableau 4 présente des ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériau. Banfill 2003 [150], Wallevik 2003 [149]:

Tableau 4. Ordres de grandeur des paramètres rhéologiques pour différents types de matériau.

	Pâte	Mortier	BAP	Béton ordinaire
Contrainte seuil τ_0 (Pa)	10-50	10-100	50-200	400-1500
Viscosité plastique μ (Pa.s)	10^{-2} -1	1-5	20-150	50-100

Dans [104], de Larrard souligne que la viscosité plastique contrôle divers aspects de la maniabilité du béton. Les bétons ayant une viscosité supérieure à 300 Pa.s sont difficiles à manier, à vibrer, à talocher et à travailler à la truelle de part leur aspect « collant ».

Kaplan [151] et Chapdelaine [152] ont également montré que le seuil et la viscosité interviennent dans la prédiction de la relation (pression à la pompe/débit de béton) lors d'opération de pompage. Même si le paramètre primordial reste le frottement béton/tuyau, les propriétés rhéologiques prennent de l'importance dans le cas des bétons à faible seuil et pour des pompages à forts débits.

En ce qui concerne les propriétés rhéologiques souhaitables pour le béton autoplçant, Wallevik, 2003 [153] a indiqué dans le tableau 5, les valeurs du seuil et de la viscosité utilisées dans les différents pays.

Tableau 5. Paramètres Binghamiens des BAP dans différents pays

Pays	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Pays	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité (Pa.s)
France	0~10	>60	Norway	10~50	30~45
Danemark	30~60	<40	Sweden	0~30	50~100
Germany	0~10	60~90	Switzerland	0~50	10~20
Holland	0~10	60~120	U.K.	10~50	50~80
Iceland	10~50	20~40	U.S.A	0~20	40~120
Japan	0~30	50~120			

Dans l'ensemble, le seuil de cisaillement du BAP est beaucoup plus faible (moins de 60 Pa) à celle du béton normal (400 ~ 1500 Pa), mais la viscosité plastique du BAP est du même ordre que celle du béton ordinaire (50 ~ 100 Pa.s).

En outre, Wallevik [153] a proposé une zone définissant des BAP en utilisant des valeurs de diagramme seuil- viscosité plastique comme le montre la figure 43.

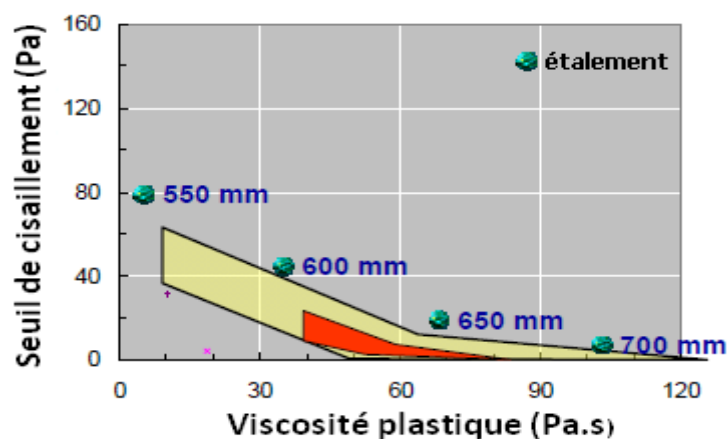


Fig. 43. Zone proposée pour le BAP dans un diagramme de Seuil-Viscosité

Si la viscosité plastique est inférieure ou égale à 40Pa, le BAP doit avoir une valeur significative du seuil afin de maintenir une homogénéité suffisante. D'autre part, si le BAP est « visqueux » c'est-à-dire qu'il a une viscosité plastique supérieure à 70 Pa.s, le seuil de cisaillement doit être proche de zéro pour atteindre une capacité de remplissage satisfaisante. L'étalement minimum pour obtenir un BAP est aussi donné en fonction des viscosités.

Le développement technologique des rhéomètres vise essentiellement une caractérisation rhéologique complète permettant une caractérisation d'ouvrabilité sans avoir recours aux tests empiriques. Ces derniers sont souvent jugés dépendants de la compétence et de l'expérience de l'opérateur, par contre les valeurs du seuil et de la viscosité sont beaucoup moins dépendantes de ces facteurs. Par conséquent, une corrélation entre les grandeurs rhéologiques et les propriétés d'ouvrabilité est donc jugée très importante.

IV. Corrélation entre grandeurs spécifiques expérimentales (τ_0 , μ) et caractéristiques rhéologiques des bétons

La majorité des auteurs s'accordent sur la nécessité de recourir à au moins deux essais empiriques différents pour établir des relations entre grandeurs spécifiques et caractéristiques rhéologiques des bétons [13, 154-156]. Ainsi, il est maintenant admis que la viscosité est corrélée au temps d'écoulement mesure au V-funnel t_{Vf} , alors que le seuil de cisaillement dépend de l'étalement et de temps de passage au diamètre de 500 mm de la galette d'étalement au cône d'Abrams t_{500} (Emborg [156], Grunewald et al [157], Utsi et al [155], Nielsson et al [158] et Mouret et al [159]). Voir la figure 44.

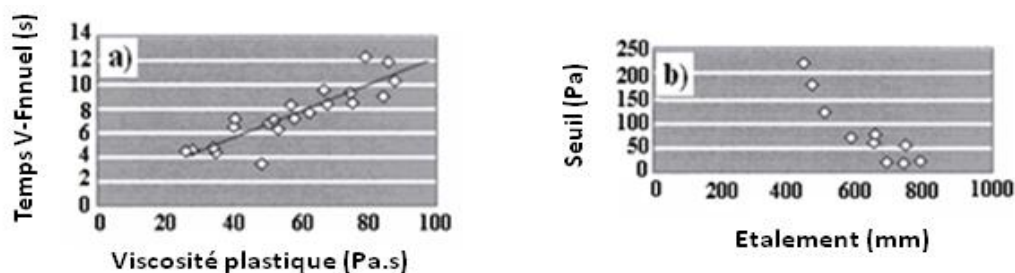


Fig. 44. a) Temps V-funnel par rapport à la viscosité plastique. b) Etalement par rapport au Seuil d'écoulement mesuré à l'aide d'un viscosimètre ConTec [154].

L'essai d'étalement au cône d'Abrams est l'un des essais empiriques les plus utilisés. On en tire deux grandeurs spécifiques : l'étalement SF et le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500 mm, t_{500} . Une relation simple semble exister entre le seuil d'écoulement et l'étalement d'un BAP (voir le tableau 6) :

Tableau 6. Corrélation entre le seuil de cisaillement et les caractéristiques rhéologiques de Béton

Auteur	Equation
Kurokawa [160]	$\tau_0 = \frac{\rho g V}{25\sqrt{3}\pi.SF} \cdot 10^8$
Coussot et al [161]	$\tau_0 = \rho \left(\frac{SF}{279} \right)^{-5}$
Sedran [94]	$\tau_0 = (808 - SF) \frac{\rho}{1174}$
Jin [93]	$\tau_0 = \beta - \delta \ln \left(\frac{SF}{\alpha} \right)$
Esping [162]	$\tau_0 = Exp \left(\frac{1071.82 - SF}{124.65} \right)$
Hu [163]	$\tau_0 = \frac{(300 - SF)}{270} \rho$
Ferraris et De Larrard [122]	$\tau_0 = \rho \frac{(300 - SF)}{347} + 212$

Définitions des variables

ρ = Masse volumique du béton; g = Accélération de la pesanteur

V = Volume du cône d'Abrams

SF = étalement

α, β, δ = réels positifs

La deuxième grandeur spécifique obtenue à partir des essais au cône d'Abrams est le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500 mm, T_{500} . Une relation simple semble exister entre la viscosité et l'étalement d'un BAP (voir le tableau 7) :

Tableau 7. Corrélation entre la viscosité et les caractéristiques rhéologiques de Béton

Auteur	Equation
Kurokawa [160]	$\eta = 0.0545 \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{40 \cdot 10^3}{SF^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{25 \cdot 10^3}{SF^2}\right) \cdot t_{500}$
Sedran [94]	$\eta = \frac{\rho}{1000} \cdot (0.026 SF - 2.39) \cdot t_{500}$
Esping [162]	$\eta = \frac{t_{500}}{0.002 \tau_0}$

Les différents résultants présents confirment l'existence de relations entre les grandeurs spécifiques mesurées à travers les essais empiriques et les caractéristiques rhéologiques des bétons. Cependant les paramètres de ces modèles changent souvent en changeant la composition du béton [162].

La composition de ces bétons doit offrir un rapport équilibré entre les propriétés recherchées sur le béton frais ou durci et les coûts de fabrication. Les principales propriétés recherchées sur le béton frais sont la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. Pour les propriétés mécaniques, le chapitre suivant explique en détails certains paramètres qui valident une composition donnée.

Chapitre 3 : Caractérisation mécanique des bétons

Les nouveaux bétons présentent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire. Ces bétons possèdent une très bonne résistance à la compression mais ne peuvent en aucun cas résister à de fortes contraintes de traction parce qu'ils présentent généralement un grand nombre de microfissures, surtout à l'interface entre les agrégats grossiers et le mortier, même avant soumission à n'importe quelle charge. C'est la principale raison de la faible résistance à la traction de béton. C'est pour pallier ce défaut qu'a été mis au point le béton renforcé de fibres.

Plusieurs essais sont exécutés ponctuellement à des échéances bien précises, comme la résistance à la compression, à la traction et à la flexion et le module d'élasticité, alors que d'autres, comme l'auscultation sonore et la maturométrie, nécessitent un suivi dans le temps, parfois même au jeune âge (entre 0 à 24 heures).

I. Essais destructifs

I.1 Essai de compression

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm qui ont été conservées après démoulage dans un bain thermostatique à 20°C (fig. 45) jusqu'à l'échéance déterminée.



Fig. 45: Bain thermostatique de stockage des éprouvettes

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, asservie en force (fig.46). La résistance à la compression a été évaluée suivant la norme EN 12390-3: les essais ont été réalisés avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Fig. 46. Machine hydraulique HP 3000 KN

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture (fig. 47). La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette :

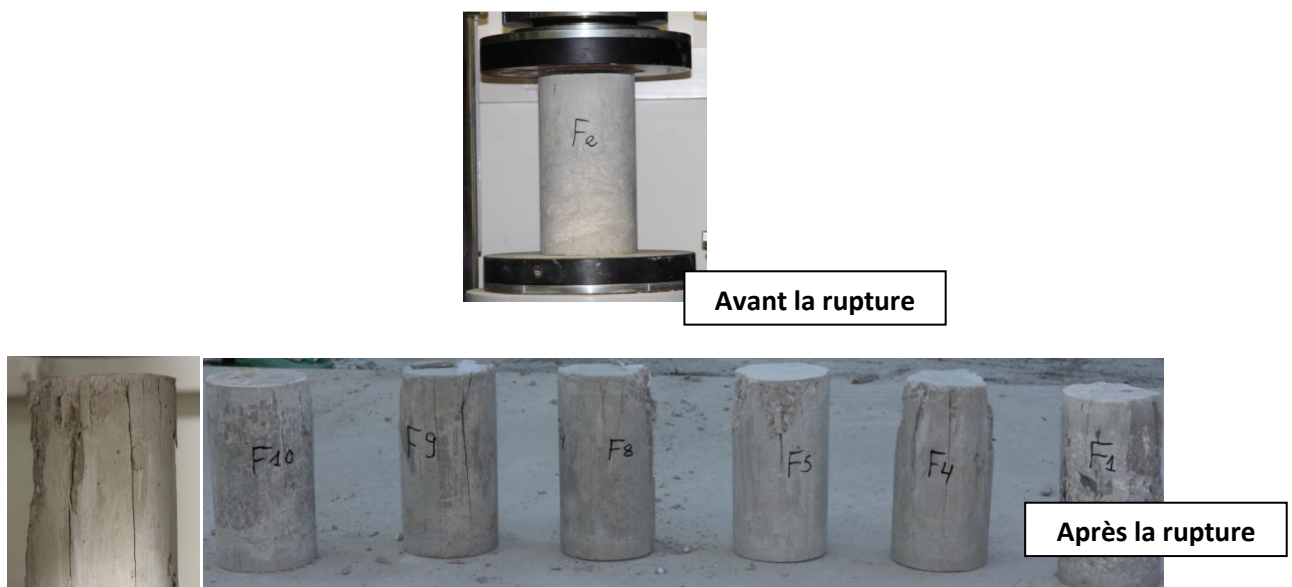


Fig. 47. Conduite de l'essai de rupture en compression

La charge de rupture, P , est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. Soit S la section orthogonale de l'éprouvette; la résistance, F_c , est exprimée en MPa à 0,5 MPa près et a pour expression : $F_c = P/S$

I.2 Essai de traction par fendage

On procède généralement par essai de fendage sur éprouvette cylindrique conformément à la norme EN 12390-6. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan (fig. 48).

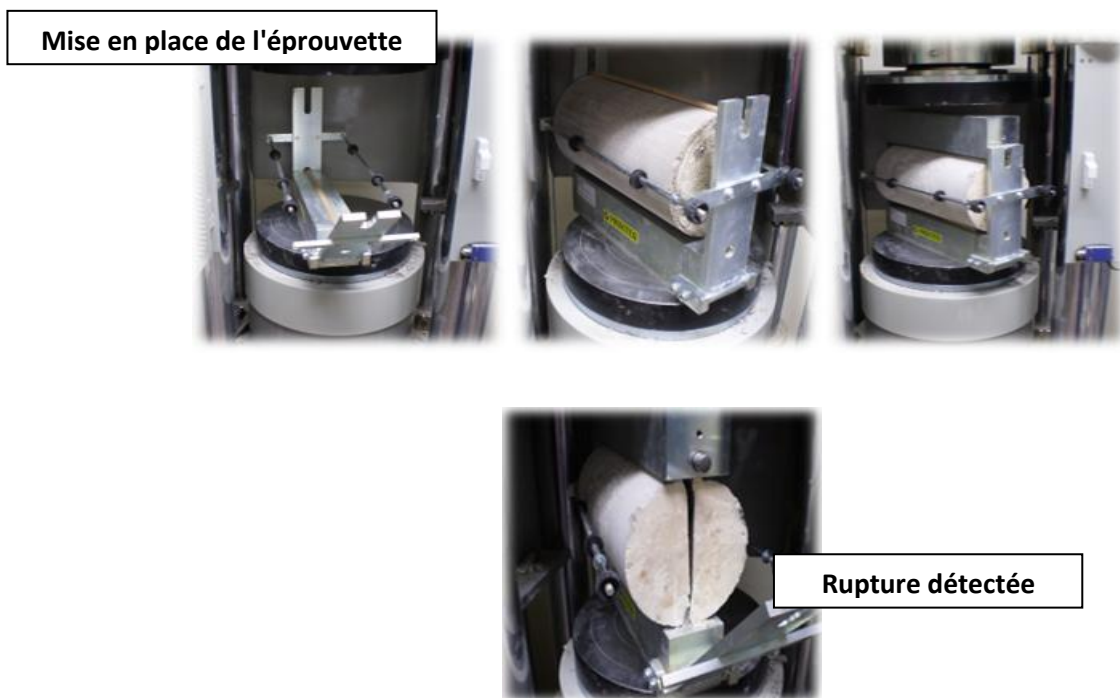


Fig. 48. Conduite de l'essai de rupture en traction par fendage

Si L est la hauteur de l'éprouvette, \varnothing son diamètre et P la charge appliquée, la contrainte de rupture vaut : $F_t = 2P / \pi \cdot \varnothing \cdot L$

I.3 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est déterminée par la charge nécessaire pour provoquer la rupture de l'éprouvette soumise à un effort de flexion appliqué aux points médians.

La poutre utilisée repose sur deux supports : l'appui double et l'appui simple. Les points d'appui sont articulés de façon à ce que les extrémités puissent se mouvoir librement pendant la flexion. La figure 49 montre une poutre simple.

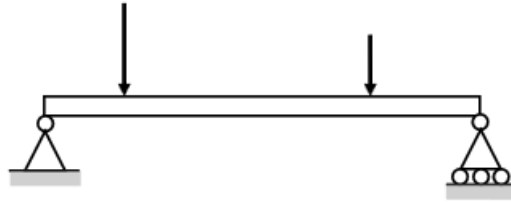
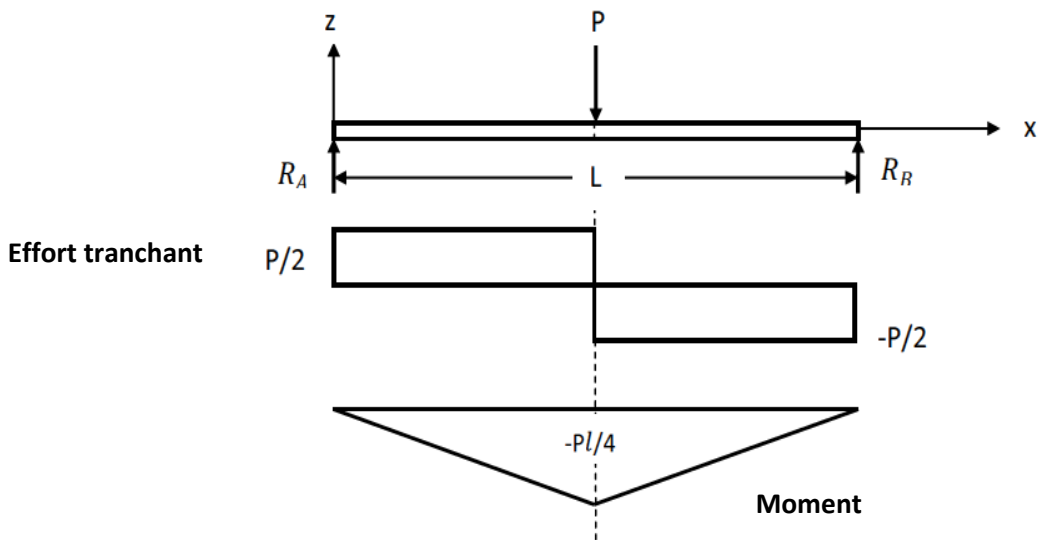


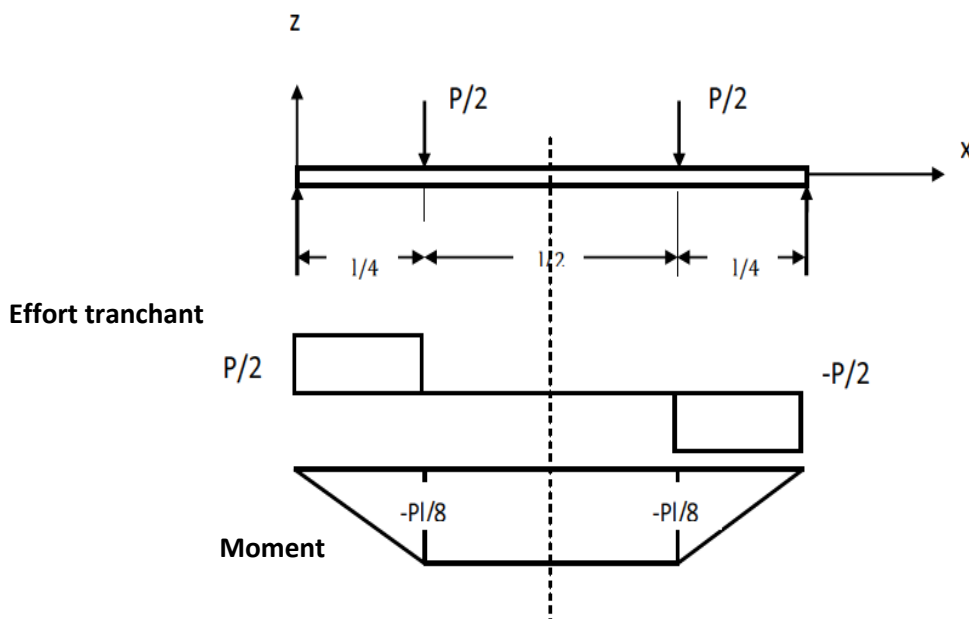
Fig. 49. Cas d'une poutre simple

Le principe de l'essai est de déterminer la résistance à la flexion des éprouvettes de béton durci suivant deux procédures :

I.3.1 Essais de flexion 3 points



I.3.2 Essais de flexion 4 points



Dans notre travail, on a utilisé la deuxième procédure, flexion 4 points, voir la figure suivante :



Fig. 50. Conduite de l'essai de rupture en traction par flexion

I.4 Mesure du module d'élasticité

Les déformations ont été obtenues par l'intermédiaire de trois jauges extensométriques posées suivant une génératrice sur la surface latérale de l'éprouvette cylindrique et radialement espacées de 120°. Le chargement mécanique a été effectué de manière continue avec une vitesse de 0,5 MPa/s. Lors de la mise en charge des échantillons, les déformations instantanées mesurées (capteur LVDT) permettent de donner directement une estimation du module élastique des bétons chargés. Voir figure 51.

Pour des petites déformations du béton, la courbe contrainte-déformation peut être assimilée à une droite. Il y a approximativement proportionnalité entre la contrainte σ_c et la déformation ε_c . Soit E_c ce coefficient de proportionnalité :

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c$$

E_c est appelé module d'élasticité.



Fig. 51. Conduite de l'essai - Module d'élasticité

Il s'agit d'appliquer des contraintes σ_c croissantes à une éprouvette de ce béton et de mesurer les déformations correspondantes, jusqu'à une valeur $\sigma_c = 0,6 F_c$. Il est alors possible de tracer la courbe $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$ pour σ_c variant entre 0 et $0,6 F_c$. Sur cette courbe, on peut mesurer la pente de la tangente à l'origine (module tangent) et la pente de la droite passant par l'origine et le point de coordonnées ε_c et $0,6 F_c$ (E_{cm} , module sécant).

$$E_{cm} = \frac{0,6 F_c}{\varepsilon_c}$$

I.5 Coefficient de Poisson

Sous l'effet du chargement de compression, l'éprouvette se raccourcit de Δh , dans la direction de la charge appliquée.

Mais dans le même temps on observe une déformation dans le sens transversal qui tend à faire augmenter le diamètre \varnothing de l'éprouvette d'une valeur $\Delta\varnothing$. La déformation relative dans le sens transversal est $\Delta\varnothing/\varnothing$.

Avec le même appareillage que celui décrit sur la figure 52 on peut accéder à ces déformations transversales de l'éprouvette, en disposant sur les couronnes des capteurs orientés perpendiculairement aux génératrices de l'éprouvette.

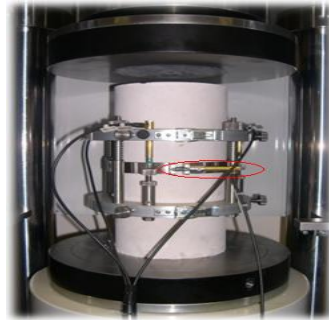


Fig. 52. Conduite de l'essai – coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson ν est le rapport, pour un chargement donné, entre la déformation relative de l'éprouvette dans le sens longitudinal (sens du chargement) et la déformation relative dans le sens transversal :

$$\nu = \left| \frac{\Delta h/h}{\Delta\varnothing/\varnothing} \right|$$

En général, nos bétons présentent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire... L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et améliore les résistances mécaniques des bétons [164] au jeune âge par effet physique principalement et par effet pouzzolanique lorsqu'elles sont chimiquement actives, à plus longues échéances [165]. Cette amélioration des résistances dépend de la nature, de la finesse et du dosage de l'addition.

En plus, le béton classique possède une très bonne résistance à la compression mais ne peut en aucun cas résister à de fortes contraintes de traction parce qu'il présente généralement un grand nombre de microfissures, surtout à l'interface entre les agrégats grossiers et le mortier, même avant soumission à n'importe quelle charge. Ces microfissures influent sur le comportement mécanique du béton, et

contribuent au comportement non linéaire à faibles niveaux de contrainte et provoquent ainsi une expansion volumique pendant le chargement. C'est la principale raison de la faible résistance à la traction du béton. C'est pour pallier ce défaut qu'a été mis au point le béton armé. C'est aussi le tout premier concept du béton renforcé de fibres, permettant d'obtenir en plus un renforcement homogène.

Avec un choix approprié du type de fibres, de leur taille ainsi que de leur dosage, il est possible d'inhiber la propagation des premières microfissures. Les fibres, en assurant le transfert de contraintes à travers la fissure, limitent son ouverture et sa propagation. La localisation de la macro fissuration est ainsi retardée, limitant ainsi la fragilité du matériau.

II. Processus de fissuration des bétons

II.1 Fissuration gouvernée par des contraintes de compression

Le processus de fissuration peut se décliner de la façon suivante : les microfissures sont créées aléatoirement au sein de l'éprouvette. Ce caractère aléatoire est lié à l'hétérogénéité du matériau et à l'existence de granulats. L'orientation des fissures, quant à elle, est gouvernée par la différence de raideur de la pâte de ciment et des granulats. Ensuite, les microfissures se rejoignent pour former des macrofissures, toujours orientées parallèlement à la direction de la sollicitation, délimitant ainsi des « colonnettes ». Enfin, des fissures obliques apparaissent à l'intérieur des « colonnettes ». Ces fissures obliques se rejoignent pour former un plan de glissement également oblique à l'échelle de l'éprouvette.

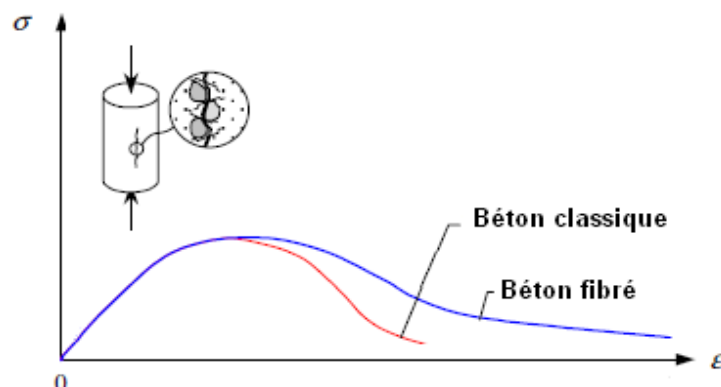


Fig. 53. Description schématique du comportement de béton en compression.

Avec la présence des fibres dans la matrice, le béton devient plus ductile (fig. 53) et les fibres offrent la résistance contre la propagation des fissures. Cependant, l'effet des fibres dépend fortement du type de fibre utilisée, la taille et les propriétés de la fibre, la fraction de volume ajoutée et les propriétés de la matrice. Voir Glavind (1992) [166].

II.2 Fissuration gouvernée par des contraintes de traction

Lorsqu'une contrainte est appliquée (Figure 54), les microfissures vont commencer à se développer, tout d'abord à l'interface entre la pâte de ciment et les granulats et par la suite ils se propagent vers le mortier (A). Une fois que la contrainte maximale est atteinte (B), les microfissures se propagent d'une manière instable et se connectent pour créer une ou plusieurs macrofissures. C'est une phase de localisation de la fissuration. Ces macrofissures se propagent à travers l'échantillon, conduisant à la chute de contraintes (C) et donc à la rupture totale du volume du matériau considéré (D).

Ainsi, contrairement au béton ordinaire, un échantillon de béton fibré ne rompt pas d'une manière fragile après le début de la première fissure. Cela a pour effet d'accroître le travail de la fracture, qui est appelée énergie de dureté ou ténacité.

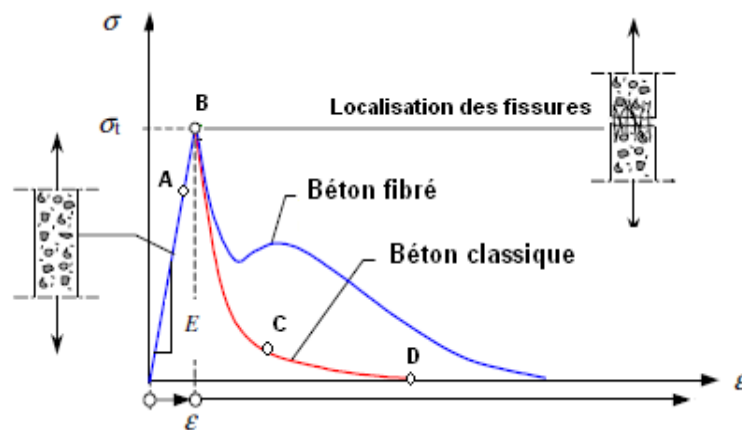


Fig. 54. Caractérisation du comportement en traction de béton.

II.3 Fissuration gouvernée par des contraintes de flexion

Ce test est la base pour la détermination des indices de ténacité, exprimant la capacité de l'éprouvette à se déformer sous l'action d'une charge statique.

Si l'on sollicite une pièce de béton en flexion, on constate schématiquement trois phases de fissuration. Une phase de microfissuration diffuse, qui correspond au comportement de matériau de la pièce. Au fur et à mesure de l'augmentation de la sollicitation, les microfissures croissent, se rejoignent. On parle de localisation ou de coalescence des fissures. Enfin elles deviennent des macrofissures qui ont un impact sur le comportement de la pièce de béton dans la structure (Figure 55).

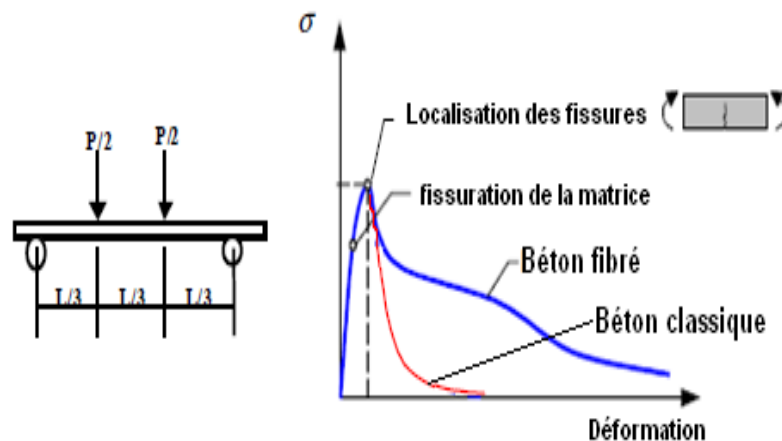


Fig. 55. Description schématique du comportement de béton en flexion.

Au niveau de la microfissuration, les fibres permettent de « coudre » les microfissures et d'éviter leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macrofissures. Ce comportement dépend également du type de fibres et du dosage utilisé.

En outre, la détermination directe de la résistance du béton nécessite des éprouvettes particulières testées dans des laboratoires. Cette procédure donne une bonne estimation de la résistance réelle du béton, mais peut causer des problèmes et des retards dans l'évaluation des structures existantes. Dans les premières heures, après la mise en œuvre, la microstructure du béton frais reste très fragile. Contrairement aux méthodes de test conventionnelles, les essais non destructifs ne peuvent pas perturber la microstructure.

III. Essais non destructifs

Le terme « non destructif » est donné à tout essai qui n'endommage pas ou n'affecte pas le comportement structural des éléments et laisse la structure dans un état

acceptable. Malhotra [167] a présenté une étude exhaustive des méthodes non destructives utilisées pour l'évaluation des structures en béton.

Pour cette raison, des techniques spéciales ont été développées dans lesquelles on a tenté de mesurer certaines propriétés : l'évolution de la température de béton en utilisant les principes de la maturométrie.

III.1 Maturométrie

Les recherches sur les processus de développement de la résistance du béton sont nombreuses. L'évolution des propriétés d'un béton dépend de plusieurs facteurs, mais pour une formulation de béton donnée, la température constitue au jeune âge le facteur influençant le plus l'hydratation du ciment. La maturométrie repose donc sur l'utilisation d'une « fonction de maturité » qui considère uniquement le temps et l'histoire de température que subit le béton.

La fonction la plus utilisée est celle basée sur la loi générale d'accélération des réactions chimiques en fonction de la température proposée par Arrhenius [168]. Cette fonction a l'avantage d'être très performante mais nécessite la connaissance d'un autre paramètre : « l'énergie d'activation du béton ». Dans le cas des bétons, il est préférable de parler d'énergie d'activation apparente, car l'hydratation des divers constituants anhydres du ciment produit plusieurs réactions chimiques qui ont chacune leur propre énergie d'activation [169,170].

III.1.1 La maturométrie pour l'estimation de la résistance du béton dans l'ouvrage [171-174]

L'évolution de la résistance à la compression à court terme du béton par la maturométrie repose sur trois points :

- a) la connaissance de l'histoire de température vécue par le béton;
- b) la notion d'âge équivalent à 20°C;
- c) la « courbe de référence du béton ».

- a) La connaissance de l'histoire de température vécue par le béton n'est pas un problème en soi. N'importe quel enregistreur de température peut le faire. Dans notre cas on a utilisé le système suivant :



Fig. 56. Mesure de l'évolution de la température au cœur de béton à l'aide des sondes

- b) Le calcul d'un d'âge équivalent à 20°C consiste à transformer l'histoire de température vécue par le béton en un âge équivalent de mûrissement à 20°C. Cela signifie que pour un béton, un âge, une résistance à la compression et un historique de température donné, on cherche à déterminer le temps qu'il aurait fallu pour obtenir la même résistance mais pour une température constante et égale à 20°C de la fin du malaxage jusqu'au moment de la mesure.

Le calcul de l'âge équivalent à 20°C utilise la loi d'Arrhenius présentée ci-dessous :

$$te = \int_0^t EXP \left(\frac{Ea}{R} \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{\theta(t) + 273} \right] \right) dt$$

Où :

Ea : Energie d'activation apparente du béton

Te : Age équivalent correspondant à un mûrissement isotherme du béton à 20 °C

R : Constante des gaz parfaits

Θ(t) : Température du béton.

Le calcul de l'âge équivalent nécessite donc de connaître un autre paramètre: l'énergie d'activation apparente du béton (Ea).

L'énergie d'activation apparente traduit la sensibilité du béton à sa température de mûrissement. L'énergie d'activation apparente d'un béton dépend [175] :

- de la composition minéralogique du ciment;
- de la finesse du ciment;
- du dosage en ciment;
- du rapport Eau/Ciment;
- des adjuvants;
- des additions minérales etc...

Il est donc nécessaire, pour chaque béton utilisé dans un ouvrage et suivi par maturométrie, de déterminer précisément ce paramètre E_a .

- c) la « courbe de référence d'un béton » est une courbe qui présente l'évolution des résistances à la compression d'un béton aux jeunes âges en fonction de son âge équivalent à 20°C. Cette courbe est réalisée à partir de casses d'éprouvettes conservées en général à 20°C ($R_c=f(4h, 8h, 12h, 24h, 32h, 48h, 72h, 28\text{jours})$).

Connaissant l'histoire de température vécue par le béton, on peut convertir l'âge réel en âge équivalent à 20°C, et donc exprimer les résistances à la compression du béton en fonction de son âge équivalent à 20°C (figure 57).

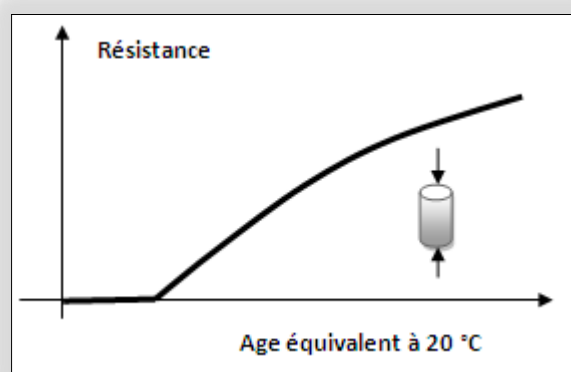


Fig. 57. Représentation schématique d'une courbe de référence

La courbe de référence d'un béton peut être considérée comme l'empreinte digitale de ce béton. En effet, quelle que soit la température de conservation des

éprouvettes, lorsqu'on représente les résistances à la compression en fonction de l'âge équivalent à 20°C on obtient une seule et unique courbe.

III.1.2 Détermination de l'énergie d'activation Ea

Concernant le comportement de la résistance à la compression, on peut appliquer le concept de maturité conformément aux travaux de (Carino et al., 2001 [171] ; Viviani et al., 2005 [174]; Barnett et al., 2006 [172], Kamen et al., 2008 [173]). L'équation (III.1.2) décrit l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps.

$$R(t) = \frac{R_u \cdot k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (\text{III.1.2})$$

Avec t_0 le temps initial au développement de la résistance (h), k la constante de réaction (1/h), R_u la résistance à la compression ultime (MPa) (dans notre cas, nous prendrons la résistance à 28 jours). La détermination de la constante de réaction s'effectue par régression linéaire (méthode des moindres carrés) de la relation sur les points expérimentaux.

La variation de la constante de réaction K peut être décrite par la loi d'Arrhenius :

$$K(T) = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right)$$

Cette équation peut se mettre sous la forme suivante :

$$\ln[(K(T))] = -\frac{Ea}{RT} + \ln(A)$$

Avec A , un paramètre indépendant de la température (1/h), Ea l'énergie d'activation (J/mol), R la constante des gaz parfaits ($R=8.314$ J/mol.K), T la température absolue (K), et k la constante de réaction.

La procédure de la détermination de « Ea » est la suivante [176] :

- confection d'éprouvettes (16x32) cylindriques en béton.
- ces éprouvettes sont soumises aux différentes conditions de cure (à des températures différentes, par exemple à 20, 30, 40 °C).
- essai de compression sur ces éprouvettes à des échéances précises (par exemple à 1, 3, 7 jours).
- pour chaque température, on trace l'évolution de la résistance des différents bétons en fonction du temps.
- on fixe une résistance, $R(t)$, qui doit être atteinte et même dépassée par les différentes séries de bétons et on calcule le temps, t_0 , nécessaire de chacune pour y arriver.
- en utilisant L'équation (III.1.2), on calcule le coefficient K et $\ln(K)$ pour chaque béton.
- on trace la fonction $\ln(K) = f(1/T)$, on obtient des points qui sont plus au moins alignés, ensuite on fait une régression linéaire de ces points pour avoir finalement une droite d'équation $y = ax + b$.

On obtient alors une équation de la même forme que l'équation d'Arrhenius :

$$ax + b = -\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln(A)$$

Par conséquent, pour obtenir l'énergie d'activation Ea , il suffit de multiplier le coefficient "a" par la constante des gaz parfaits (R).

III.1.3 Calcul du temps équivalent

Sur un chantier, on place lors du bétonnage des thermocouples qui permettront d'obtenir les températures à cœur.

- On obtient une courbe qui représente la variation de la température en fonction du temps.
- En intégrant la loi d'Arrhenius, on obtient la température équivalente sur les différents intervalles.

$$te = \int_0^t EXP \left(\frac{Ea}{R} \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{\theta(t) + 273} \right] \right) dt$$

Connaissant le temps équivalent, on peut déterminer la résistance du béton à n'importe quel âge en se référant à la courbe de référence qui doit être déjà établie.

En résumé, le principe est schématisé de la façon suivante :

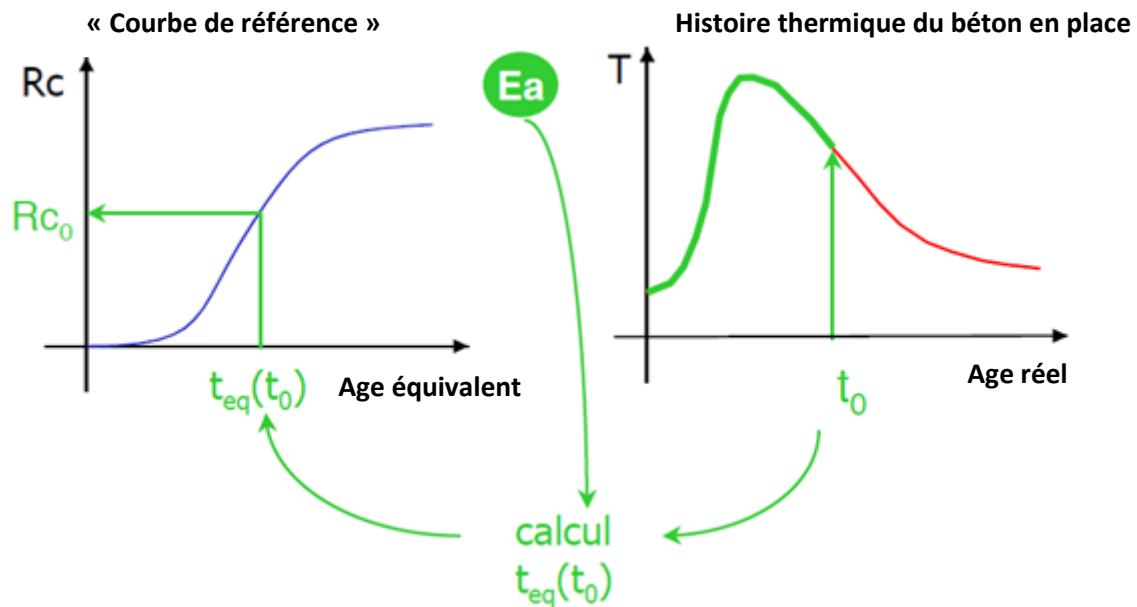


Fig. 58. Méthode maturométrique

L'application de la méthode maturométrique (fig. 58) permet de traiter de façon plus fine l'évaluation de la résistance au jeune âge en définissant par exemple les points critiques d'un ouvrage. L'information est instantanée ou quasi-instantanée et ne nécessite pas de transporter des éprouvettes, de fixer et d'organiser des échéances d'écrasement. Elle est également plus riche qu'un simple résultat d'écrasement puisqu'on peut facilement prévoir le délai nécessaire à l'obtention de la résistance requise (par extrapolation sur la courbe de température). Un exemple d'application est présenté dans l'AXE 3 "Exploitation et analyse des résultats".

En outre, comme indiqué ci-dessus, le principe de la maturométrie est très connu, mais notre procédure sert à contrôler l'influence des fibres métalliques et synthétiques sur l'évolution de la température ainsi que la résistance au très jeune âge.

AXE 2

NOUVELLES APPROCHES POUR FORMULER ET ANALYSER À L'ETAT FRAIS LES BÉTONS

I.	Matériaux utilisés.....	98
II.	Influence des additions sur l'écoulement de mélange.....	102
III.	Méthode adoptée pour la formulation des BAP.....	108
IV.	Procédure de fabrication.....	119
V.	Caractérisation d'écoulement des bétons : Nouvelle approche.....	120
VI.	Etude de la remontée d'eau sur une surface verticale.....	144
VII.	Auscultation sonique de béton frais.....	154

I. Matériaux utilisés

I.1 Ciments

Les ciments utilisés pour la fabrication des éprouvettes sont : (1) le ciment CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF "HRC" essentiellement destiné aux travaux d'ouvrages en béton soumis à des eaux à hautes teneurs en sulfates ou à des environnements chimiques moyennement et fortement agressifs; (2) le ciment CEM II/B-M(LL-S) 32,5 R CE NF destiné aux travaux de bâtiment, Génie Civil industriel et routier; et (3) le ciment CEM I 52,5 R CE CP2 NF destiné aux travaux de bâtiment et de Génie Civil nécessitant de fortes résistances à court terme et à long terme.

Par rapport aux autres ciments, le CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF "HRC" présente des limitations en termes de constituants secondaires (faible teneur en C₃A) et offre un temps d'ouvrabilité plus large.

La composition physico-chimique des ciments est rapportée dans le tableau 8. Ces ciments, provenant de l'usine de Beaucaire Marseille-France (ciments Calcia), ont été réalisés selon les normes européennes NF EN 197-1.

Tableau 8 : Composition physico-chimique des ciments (Valeurs moyennes en %)

Dénomination des produits	Clinker ≥ 95%			SO ₃	Na ₂ O Equivalent Actif	Finesse Blaine (cm ² /g)	Début de prise	Résistances mécaniques mortier CEN en MPa		
	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S					1J	2J	28J
CEM II/B-M(LL-S) 32,5 R CE NF	8,9	68,5	11	3,2	0,31	3720	3h00	-	19	47
CEM I 52,5 R CE CP2 NF	8,9	68,5	11	3,6	0,41	4810	2h10	28	39	69
CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF "HRC"	2,3	75,5	10,2	2	0,32	4280	3h10	18	31	63

I.2 Fillers calcaires

Leurs caractéristiques physico-chimiques sont présentées dans le tableau suivant (tableau 9).

Tableau 9 : Caractéristiques du filler Calcaire- Pétrographie : CALCAIRE

<i>ESSAIS</i>	<i>Filler Calcaire Carmeuse</i>	<i>Filler Calcaire Bronzo</i>	<i>Normes</i>
Classe Granulaire (mm)	0-0,063	0-2	-
Surface Blaine (m²/Kg)	555	212	NF EN 196-6
Demande en eau (%)	0,60	-	LCR 2003-04
Valeur de Bleu (g/Kg)	0,66	0,10	EN 933-9
Teneur en eau (%)	0,13	0	EN 1097-5

I.3 Fumée de silice

Les fumées de silice utilisées (Sikacrete HD) ont des tailles ultrafines (entre 0,01 et quelques micromètres), elles contiennent plus de 90% de silice amorphe : est un additif minéral qui permet de confectionner des bétons à hautes performances ayant une durabilité exceptionnelle.

I.4 Granulats

Dans notre travail, les granulats concassés, de roche naturelle calcaire, sont extraits et fabriqués par LAFARGE-Granulats (Région Sud-Est France). Deux classes sont utilisées pour la composition des bétons : du sable « 0/2 » et des gravillons « 6,3/10 ». Leur analyse granulométrique est présentée sur la figure 59 et leurs propriétés physiques sont présentées dans le tableau 10.

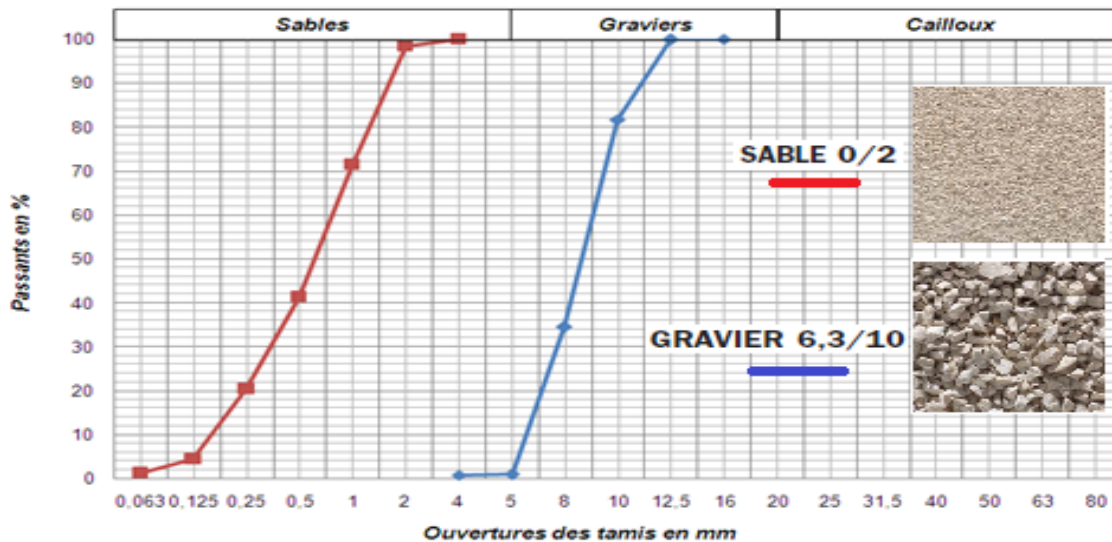


Fig. 59. Courbe d'analyse granulométrique des agrégats

Tableau 10 : Caractéristiques physiques des granulats

Paramètres	Granulats		Remarques NF EN 12620
	Gravillon 6,3/10	Sable 0/2	
Teneur en eau w	0	0,56	-
Coefficient d'Absorption	0,9	1,5	-
Coefficient d'Aplatissement (%)	9,03	-	< 20
Module de Finesse	-	2,637	2,1 < Mf < 3,5
Equivalent de sable	-	62,53	60 < ES < 70
Masse volumique (g/cm ³)	2,5	2,77	-
Coefficient Los Angeles	23,2	-	LA < 30

I.5 Superplastifiants

Dans ces travaux, des superplastifiants/hauts réducteurs d'eau à base de copolymère acrylique ont été ajoutés aux mélanges pour fournir la fluidité souhaitée. Les superplastifiants utilisés sont SIKA FLUID, KRONO 20, TEMPO 9 et TEMPO 16 produites par la société SIKA France. La classification 3R (Rhéologie, Résistance initiale, Réduction d'eau) de ces produits est représentée dans la figure 60 et leurs données techniques sont données dans le tableau 11.



Fig. 60. Classification 3R des Superplastifiants

Le TEMPO 16 est un fluidifiant qui confère aux bétons une haute rhéologie et le KRONO 20 offre aux bétons une très forte réduction d'eau et une forte résistance initiale (fig. 60).

Tableau 11 : Caractéristiques physico chimiques des superplastifiants utilisés

Superplastifiants	Notation	Densité	pH	Extrait sec (%)	Teneur en Cl ⁻	Teneur en Na ₂ O _{eq}
SIKA FLUID	SF	1,20 ± 0,02	6,5 ± 1,5	40 ± 2%	≤ 0,1 %	≤ 2 %
KRONO 20	K 20	1,085 ± 0,01	4,5 ± 1	41 ± 1,5%	≤ 0,1 %	≤ 1 %
TEMPO 9	T 9	1,07 ± 0,01	4,5 ± 1	33 ± 1,5%	≤ 0,1 %	≤ 1 %
TEMPO 16	T 16	1,055 ± 0,015	3 ± 1	24 ± 1,2%	≤ 0,1 %	≤ 1 %

I.6 Fibres

Quatre fibres ont été utilisées. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant (tableau 12).

Tableau 12 : Caractéristiques géométriques des fibres utilisées dans notre étude

Fibres	Nature	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Elancement $\lambda = L/d$	Densité Kg/m ³	Résistance en traction MPa
ESF 25	Métallique	25	2,5	10	7,2	1100
RC 80/50	Métallique	50	0,62	80	2,5	1270
Macro-synthétique	Copolymère	54	-	-	0,92	580
Micro-synthétique	Polypropylène	12 à 20	34 μ m	353-588	0,91	Anti fissuration



Fibres métallique RC80/50. Fibres métallique ESF 25. Fibres Macro-synthétique. Fibres Micro-synthétique.

La nouveauté essentielle apparue dans la technologie des bétons dans les dernières années est bien l'utilisation croissante des superplastifiants et des additions minérales. Ces produits ont la capacité de transformer un béton de consistance ferme en une suspension fluide, qui s'étale et remplit un récipient sous son propre poids.

II. Influence des additions sur l'écoulement de mélange

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers calcaires et de fumée de silice sur les performances rhéologiques des bétons. Voir les travaux de Bilberg, 1999 [29], Zhu et Gibbs, 1999 [30], Kara-Ali R., 2002 [31], R. Sersale [32], H. Pichon et al.[33], Park Noh [34] Ferraris et al. [35], Shi et al. [36], Carlsward et al. [37]. Mais parfois, les conclusions sur cet effet restent contradictoires

Afin de valoriser l'effet de ces constituants sur la fluidité d'un liant (liant=ciment+additions+eau), nous avons proposé l'outil suivant : l'écoulement de liant dans un cône de Marsh couplé à un canal horizontal en plexiglas (fig. 61).

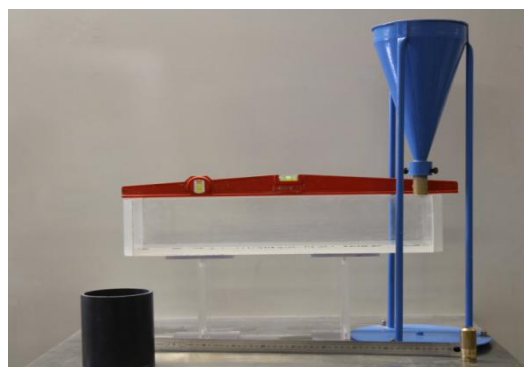


Fig. 61. Etude expérimentale d'écoulement de liant : Cône de Marsh et canal horizontal en plexiglas

Le cône de Marsh (fig. 61) est un outil normalisé -NF EN 445 ou P18 358- simple et efficace pour caractériser globalement la fluidité relative des pâtes de ciment avec

superplastifiant. Le principe de caractérisation est de mesurer le temps d'écoulement d'un volume donné du liant à travers un ajutage.

Tout en visualisant le profil d'écoulement, l'utilisation d'un canal horizontal en plexiglas nous donne une idée claire sur la capacité de remplissage de liant (fig. 62).



Fig. 62. Profil d'écoulement dans le canal horizontal selon la viscosité de liant

L'étude expérimentale s'articule sur la mesure du temps d'écoulement dans le cône de Marsh d'un liant, en faisant varier le rapport E/C, le dosage en superplastifiant, le type et la quantité d'ajout utilisé.

L'essai consiste à mesurer le temps qu'il faut pour vider un cône contenant 1 litre de liant à travers un orifice d'évacuation de 10 mm de diamètre. Ce temps est de 6 secondes pour l'eau. En utilisant un malaxeur de mortier (fig. 63), la procédure de fabrication d'un coulis (Norme P18-357) est la suivante (tableau 13):

Tableau 13. Fabrication d'un coulis

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de 1/3 de l'adjuvant	Introduction du ciment		Introduction de 2/3 restant de l'adjuvant
Durée				1 min	1 min 30 s
Etat du malaxeur	Arrêt			Vitesse lente	



Fig. 63. Malaxeur de mortier

On mesure le temps d'écoulement à 5 minutes après le début du malaxage. Le temps d'écoulement que l'on mesure permet d'évaluer la fluidité du liant. Plus ce temps est long, plus le liant est visqueux et plus il est court, plus le liant est fluide.

II.1 Effet du dosage de superplastifiant

Le choix du type et du dosage de superplastifiant a une importance capitale pour avoir la fluidité la plus stable.

Pour les différents dosages en superplastifiants (par rapport à la masse de ciment), l'évolution de temps d'écoulement T (en seconde) est présentée dans la figure 64.

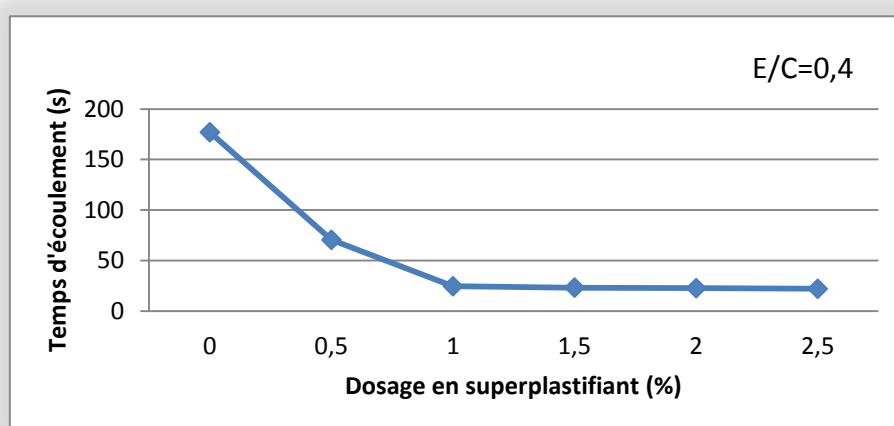


Fig. 64. Variation de la fluidité d'un coulis en fonction de son dosage en superplastifiant

Le temps d'écoulement au cône de Marsh diminue d'autant moins rapidement en fonction du dosage en superplastifiant.

La courbe obtenue nous renseigne sur deux points essentiels qui gouvernent le comportement rhéologique de la combinaison ciment-superplastifiant étudiée: (1) le dosage critique correspondant au point de saturation (cassure dans la courbe de fluidité/dosage en superplastifiant) est de l'ordre de 1%; (2) le degré de fluidité pour ce dosage critique est de l'ordre de 22 secondes.

Lorsqu'on rajoute du superplastifiant au-delà du point de saturation, on n'améliore plus la fluidité du liant (fig. 64) et on ne fait qu'augmenter les risques de sédimentation et de retard de prise du ciment dus à un surdosage en superplastifiant. La figure 65 montre le profil d'écoulement de certains mélanges.

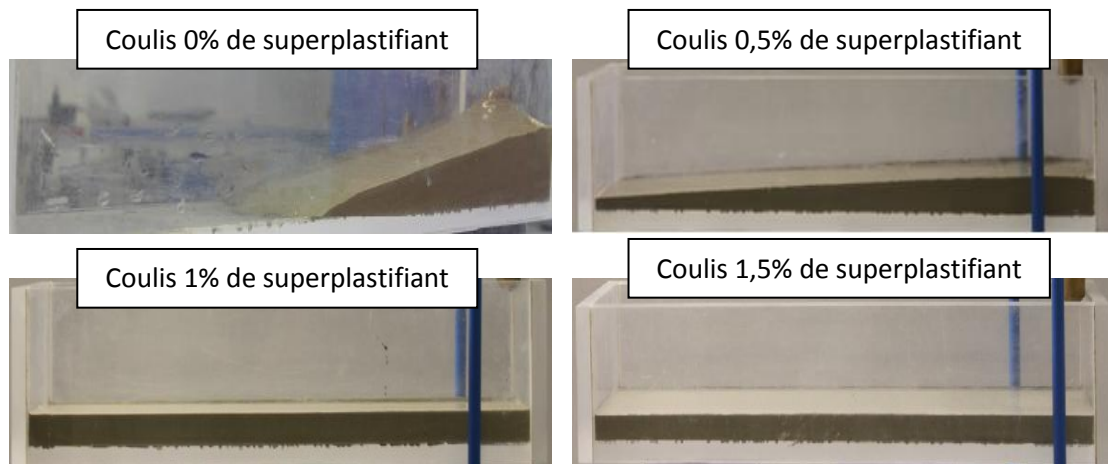


Fig. 65. Profil d'écoulement selon le taux de dosage en superplastifiant

II.2 Effet du rapport E/C

En outre, la fluidité du liant est très influencée par la quantité d'eau de gâchage, pour cela on a pris le même dosage de superplastifiant (1%) en faisant varier le rapport E/C de 0,3 à 0,5.

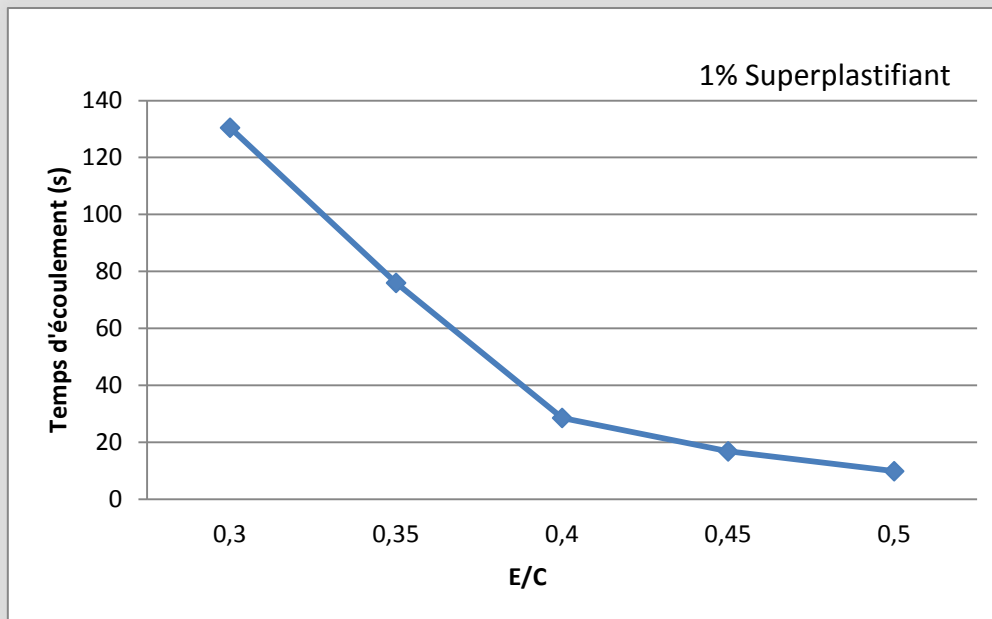


Fig. 66. Evolution de temps d'écoulement en fonction d'E/C

Les résultats présentés dans la figure 66 montrent une diminution du temps d'écoulement de 130 à 10 secondes en allant d'un rapport E/C de 0,3 vers 0,5. Ceci est en conformité avec l'usage des superplastifiants qui deviennent moins utiles lorsque l'eau de gâchage est abondante.

II.3 Effet des ajouts minéraux

Lorsqu'on substitue le ciment par le filler calcaire ou par la fumée de silice, la fluidité du liant obtenu avec le superplastifiant est très influencée par le taux et le type de l'ajout utilisé.

Pour un taux de substitution de 10, 20, 30, 40 et 50% (par rapport à la masse de ciment), l'évolution de temps d'écoulement est présentée dans la figure 67 et le tableau 14.

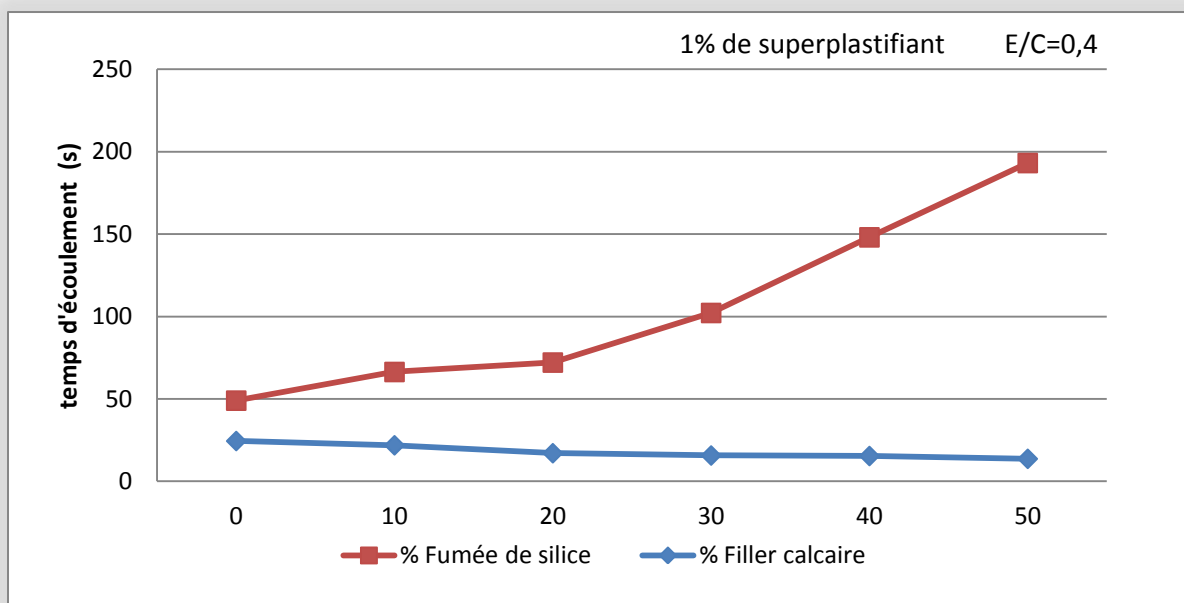


Fig. 67. Evolution de temps d'écoulement en fonction de type d'ajout

Tableau 14. Evolution de temps d'écoulement en fonction de taux de substitution d'ajout

		Taux de substitution en %					
		0	10	20	30	40	50
Temps (s)	Filler Calcaire	24,5	21,9	17,1	15,7	15,4	13,7
	Fumée de silice	24,5	44,5	55	86,5	132,7	179,5

La figure 67 et le tableau 14 illustrent clairement deux comportements différents pour les deux types d'ajout, tel que les pourcentages élevés de la fumée de silice entraînent une diminution significative de la fluidité du liant. Ceci est confirmé par les résultats trouvés par d'autres chercheurs sur l'effet pouzzolanique de la fumée de silice [183]. Par contre la substitution du ciment avec le filler calcaire a un effet favorable sur la fluidité du coulis, le dosage de saturation est d'environ 30 %. Après ce dosage, le temps d'écoulement ne diminue que de 2 secondes avec le dosage de filler calcaire.

En conclusion, cette approche est un outil efficace pour caractériser la fluidité relative des pâtes de ciment. En plus, l'utilisation du canal horizontal en plexiglas permet de décrire rapidement le profil d'écoulement et donc donner une idée sur la capacité de remplissage de mélange. D'une manière générale, il existe d'autres essais qui permettent d'analyser la fluidité relative des liants, mais notre procédure a un effet visuel et pratique (pédagogique) sur l'évolution des résultats. En outre, les résultats trouvés restent un exemple général et, donc, on ne va pas les utiliser dans notre étude.

La connaissance de l'influence de chaque constituant sur le comportement de liant permet d'identifier son rôle ainsi que son pourcentage dans une formulation donnée.

III. Méthode adoptée pour la formulation des BAP

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps [139].

Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée.

En outre, les bétons autoplaçants proposent des solutions adaptées à chaque type d'ouvrage, à la nature du chantier, aux conditions de mise en œuvre et aux exigences esthétiques. Ces bétons disposent d'une composition granulométrique étudiée et présentent une excellente ouvrabilité grâce à l'ajout de superplastifiants.

La méthode de formulation que nous proposons dans ce travail est basée sur la norme Européenne EN 206-1.

Notre objectif est de proposer une méthode simple qui s'appuie sur les caractéristiques physico-chimiques des constituants et sur le cahier des charges en termes notamment de :

- consistance adaptée à sa destination, généralement définie par l'étalement au cône d'Abrams ;
- qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours ;
- qualités de durabilité qui conduisent à imposer une résistance caractéristique minimum, un dosage minimum en liant équivalent (C+kA) et un rapport maximum E / (C+kA) selon la classe d'exposition, comme indiqué à l'annexe 5 : Valeurs limites vis-à-vis de la durabilité).

La formulation du béton doit permettre de respecter les deux premières exigences au moindre coût, le plus souvent donc à partir d'un dosage en ciment le plus faible tout en vérifiant que le dosage minimal est atteint.

III.1 Quantité de ciment - prise en compte de l'agressivité du milieu

L'exposition des bétons aux environnements agressifs a fait l'objet d'une réflexion normative. Le fascicule de documentation P 18-011 (bétons : classification des Environnements agressifs) fournit des recommandations complémentaires aux exigences de la norme NF EN 206-1 pour les bétons soumis à des environnements chimiques agressifs. Il recommande en particulier des mesures préventives pour la formulation des bétons (dosage minimal en ciment, valeur maximale du rapport E/C) afin d'assurer leur durabilité (tableau 15).

Tableau 15 : Extrait de la norme P 18-011- dosages en ciment en fonction du niveau d'agressivité

Niveau d'agressivité	A2 Moyennement agressif	A3 Fortement agressif	A4 Très fortement agressif	Remarques
Dosage minimal en ciment (Kg.m ⁻³)	$550 / \sqrt[5]{D}$	$700 / \sqrt[5]{D}$	$700 / \sqrt[5]{D}$ éventuellement	Fonction de la dimension maximale en mm des granulats (D).
E/C	≤0.55	<0.50	<0.50 éventuellement	Tenir compte de l'absorption par les granulats.

III.2 Estimation de la résistance cible [184]

Les trois paramètres : classe du ciment, squelette granulaire, porosité de la pâte, sont reliés à la résistance du béton à 28 jours (f_{cm28}) en MPa par la formule de Féret :

$$f_{cm28} = G\sigma_{c28}(1-p)^2 = G\sigma_{c28}c^2$$

Dans cette relation, σ_{c28} est la classe vraie du ciment utilisé en MPa, p est la porosité de la pâte au moment de la mise en place et c la compacité :

$$c = 1 - p = \frac{v_c}{v_c + v_e + v_v}$$

La résistance d'un béton sera d'autant plus élevée que le ciment utilisé sera plus résistant. Cette résistance est définie par la classe vraie σ_{c28} . Voir tableau 16 :

Tableau 16 : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ_{c28}	45 MPa	55 MPa	> 60 MPa

La classe vraie du ciment est considérée comme la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé.

G est un coefficient sans dimension, appelé coefficient granulaire, qui dépend de la nature des granulats. Si ces granulats sont de même qualité dans leurs différentes classes granulométriques, G est pratiquement indépendant de la granulométrie. En général G varie peu autour de 5.

On écrit le plus souvent la formule de Féret en fonction des volumes respectifs de ciment, d'eau et d'air dans le mélange initial :

$$f_{cm28} = G \times \sigma_{c28} \times \left(\frac{v_c}{v_c + v_e + v_v} \right)^2$$

En fonction des masses de ciment C et d'eau E, la formule s'écrit :

$$f_{cm28} = \frac{G\sigma_{c28}}{\left(1 + \rho_c \frac{E}{C}\right)^2}$$

☞ Une autre formule plus utilisée aussi ; c'est la formule de Bolomey :

$$f_{cm28} = \sigma_{c28} \times K_b \left(K_v \times \frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec

K_b : Coefficient dépendant des granulats et de leur arrangement granulaire.

K_v : Coefficient dépendant de la consistance du béton.

- **Valeurs estimées de K_b :**

Nature pétrographique des granulats	D (mm)		
	10 à 16	20 à 25	30 à 40
Siliceux, légèrement altérés	0.45	0.50	0.55
Siliceux, roulés	0.50	0.55	0.60
Calcaires, durs	0.55	0.60	0.65

- **Valeurs estimées de K_v :**

Consistance	S1	S2	S3	S4	S5
K_v	0.87	0.90	0.93	0.93	0.93

III.3 Additions minérales

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les bétons autoplaçants contiennent une quantité de fines, notée A, de l'ordre de 500 kg/m^3 (selon les recommandations de l'AFGC).

Pour tenir compte, vis-à-vis de la durabilité, des additions associées à des CEM I, la norme EN 206-1 introduit la notion de « liant équivalent $L=C + k F$ ». Le coefficient k varie en fonction de la nature de l'addition F .

III.4 Dosage des granulats

Le raisonnement précédent montre l'existence d'un dosage optimal en fines permettant d'atteindre une porosité minimale du squelette solide. Les résultats présentés sur la courbe granulométrique mettent en évidence ce dosage.

$$V_{\text{Granulats}} = 1000 - V_{\text{pâte}}$$

Avec $V_{\text{pâte}}$ est le volume de pâte: $V_{\text{pâte}} = V_c + V_E + V_F$

Connaissant le volume total absolu des granulats $V_{\text{Granulats}}$ et les pourcentages en volume absolue de sable ($S \%$) et de gravillon ($G \%$), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (VS) de gravillon (VG) ainsi que leurs masses respectives (S et G) :

$$V_{\text{absolu Sable}} = V_{\text{Granulats}} \times S \% \quad \Longrightarrow \quad S = V_{\text{Granulats}} \times S \% \times \rho_{s(S)}$$

$$V_{\text{absolu Gravier}} = V_{\text{Granulats}} \times G \% \quad \Longrightarrow \quad G = V_{\text{Granulats}} \times G \% \times \rho_{s(G)}$$

Avec $\rho_{s(S)}$ et $\rho_{s(G)}$ est respectivement la masse volumique de sable et de gravillon.

Selon les recommandations de l'AFGC le rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) est proche de 1 ($S \% = G \%$).

III.5 Dosage en superplastifiant

Le superplastifiant sera à ajuster expérimentalement en utilisant le cône de Marsh.

En effet, cette formulation satisfait à la condition de résistance et de durabilité. Mais son ouvrabilité n'est peut être pas satisfaisante. Pour la vérifier, on réalise des gâchées en laboratoire, à partir desquelles la consistance est mesurée.

Une première opération consiste à augmenter progressivement le dosage en superplastifiant pour chercher à fluidifier le béton. Si cette opération est insuffisante ou non économique, on change alors le rapport E/C (tout en respectant la résistance) et on reproduit les mesures de consistance.

Selon les recommandations de l'AFGC le dosage en superplastifiant est proche du dosage de saturation pour obtenir la fluidité souhaitée.

Il est vrai que lorsque l'on entame un travail de formulation d'un béton autoplaçant, on commence toujours par fixer le rapport (Fillers/Ciment + Fillers). Ce dernier qui est généralement dicté par des considérations de résistance ciblée et aussi par les considérations de durabilité.

Pour chaque mélange [filler calcaire + ciment] et un rapport [Eau / (Liant)] il existe un dosage en superplastifiant (dosage de saturation) au-delà duquel aucun gain de fluidité n'est possible.

L'adoption de cette méthode pour la détermination du dosage en superplastifiant pour un béton autoplaçant permet de réduire le nombre de paramètres dans l'étude d'optimisation de la composition des mortiers à un paramètre au lieu de deux puisque la méthode japonaise préconise l'optimisation du mortier en faisant varier à la fois le dosage en eau et en superplastifiant.

Pour optimiser la composition des mortiers, nous proposons de fixer le dosage en superplastifiant à la saturation puis de ne faire varier que le dosage en eau, si nécessaire, pour obtenir la fluidité voulue. Cette fluidité sera caractérisée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams ou par l'essai V-Funnel.

III.6 Prise en compte de l'eau apportée ou retenue par les matériaux et produits

Si les granulats utilisés ont une porosité négligeable, le plus simple est de les utiliser secs, de manière à contrôler au mieux la quantité d'eau introduite dans le malaxeur. Dans ce cas, si E est le dosage en eau efficace (tel qu'il a été déterminé par le calcul préparatoire) ; si Ad est le dosage en extrait sec d'adjuvant ; si le pourcentage d'extrait sec contenu dans l'adjuvant tel qu'il est commercialisé sous sa forme liquide

est désigné par « extrait sec (%) » ; Alors, il faut prévoir un dosage en adjuvant sous sa forme liquide M_{Ad} et un dosage en eau d'apport E_a (eau ajoutée) tels que :

$$M_{Ad} = \frac{Ad}{\text{Extrait sec (\%)}}$$

$$E_a = E - M_{Ad}(100\% - \text{extrait sec}(\%)).$$

Lorsque les granulats ont une porosité non négligeable, ils doivent être introduits humides dans le malaxeur de manière à ce qu'ils aient préalablement absorbé la quantité d'eau correspondant à leur porosité. Sinon cette absorption se produira au cours du malaxage et la consistance du matériau pourra en être très modifiée. Le dosage en eau d'apport devient alors :

$$E_a = E - S(w_s - Ab_s) - G(w_G - Ab_G) - M_{Ad} \cdot (100\% - \text{extrait sec}(\%)).$$

Avec :

G est le dosage en gravillon à l'état sec, w_G sa teneur en eau et Ab_G son coefficient d'absorption ; S est le dosage en sable à l'état sec, w_s sa teneur en eau et Ab_s son coefficient d'absorption.

III.7 Conclusion : Démarche proposée pour la formulation des BAP

Dans cette partie, nous avons présenté un travail de formulation des bétons autoplaçants en se basant sur les approches récurrentes citées dans la littérature et sur les normes: EN 206-1 et P 18-011. Nous proposons, alors, la démarche suivante:

- dosage en ciment en fonction du niveau d'agressivité et de diamètre maximale des granulats utilisés (extrait de la norme P 18-011).
- dosage en eau (en inversant la loi de Féret) :

$$E = \left(\sqrt{\frac{G\sigma_{c28}}{f_{cm28}}} - 1 \right) \times C / \rho_c$$

- dosage en filler calcaire F : la quantité de fines ($F+C$) est fixée à 520 Kg/m^3 .

- dosage des granulats : Ils se partagent en proportion volumique égale entre le sable et les gravillons. $V_{\text{Granulats}} = 1000 - V_{\text{pâte}}$
- dosage en superplastifiant : Détermination du degré de saturation en utilisant le cône de Marsh.
- eau introduite dans le malaxeur :

$$E_a = E - S(w_s - Ab_s) - G(w_G - Ab_G) - M_{Ad} \cdot (100\% - \text{extrait sec}(\%)).$$

III.8 Application : Région d'Aix-Marseille

La classe d'exposition **XF3**: Voir la carte des zones de gel et des niveaux de salage (fig. 68) : ➔ Milieu moyennement agressif.

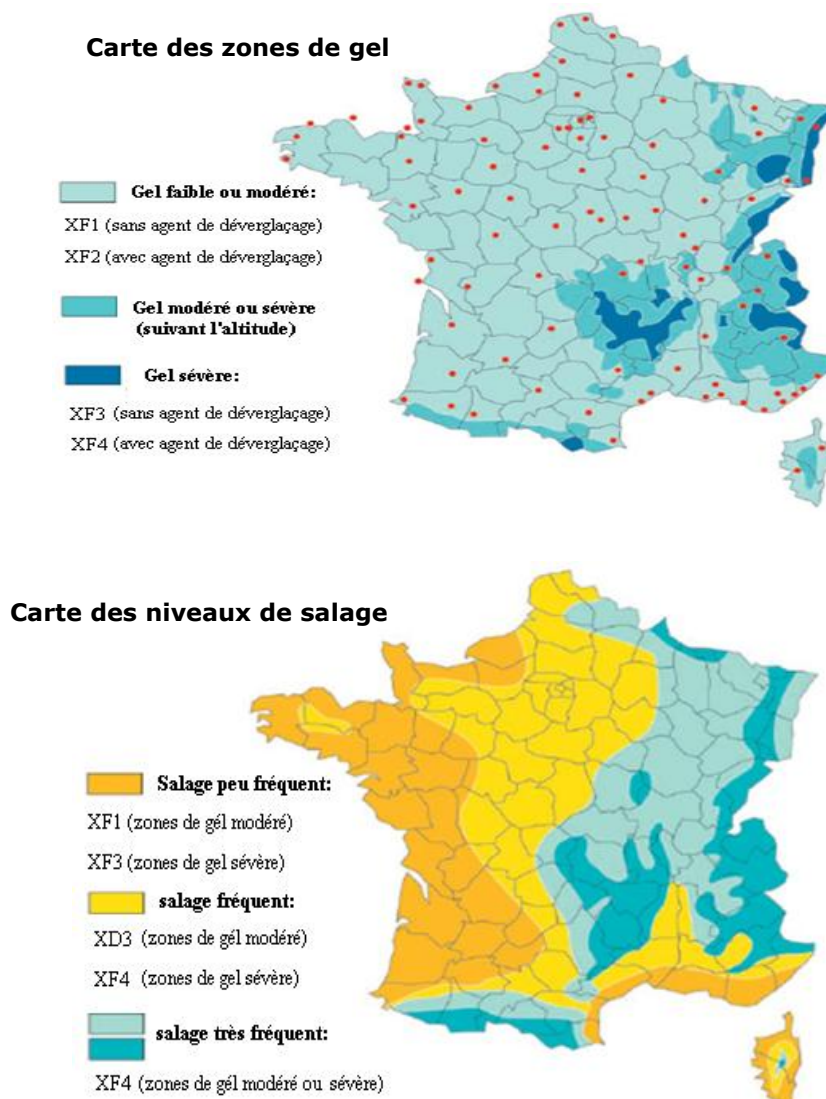


Fig.68 . Classe d'exposition – France

III.8.1 Détermination de la quantité de ciment : Voir tableau 15

Pour le niveau A2 (milieu Moyennement agressif) et comme $D = 10$ mm (Diamètre maximale des granulats) $\Rightarrow C_{\min} = 347 \text{ Kg/m}^3$.

Pour s'assurer une marge de sécurité et compte tenu des résultats de la littérature on a imposé un dosage **$C=350 \text{ Kg/m}^3$** .

III.8.2 Dosage en eau E

Soit à formuler un béton autoplaçant de résistance moyenne f_{cm} en compression de l'ordre de 60 MPa à 28 jours et de consistance fluide. Le ciment est de type CEM I 52,5 R de résistance moyenne de 65 MPa. On dispose pour cela des granulats de nature pétrographique : Calcaire dur, leur diamètre maximal est de 10 mm.

- En inversant la loi de Féret, on trouve $E/C = 0,421$.
- En inversant la loi de Bolomey, on trouve $E/C = 0,427$.

En admettant que le niveau d'agressivité conduise à une valeur minimale de la masse de ciment de 350 kg/m^3 , il est possible de partir de cette valeur pour calculer la quantité d'eau (en utilisant la valeur de E/C trouvée par loi de Féret) : **$E = 0,421 \times 350 = 147 \text{ kg/m}^3$** .

III.8.3 Dosage en additions

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines, notée A, de l'ordre de 500 kg/m^3 (selon les recommandations de l'AFGC). On prend $A=F+C=520 \text{ Kg/m}^3 \Rightarrow F=170 \text{ Kg/m}^3$.

- Le dosage massique en liant équivalent est : $L=C + k F$

Le coefficient k varie en fonction de la nature de l'addition : Pour le Filler calcaire, $k = 0.25$;

Le dosage massique en liant équivalent devient alors : $L= C + k F = 350+ 0.25 \times 170 = 392.5 \text{ Kg/m}^3$.

Et donc le rapport Eau/Liant devient : **$E/L=0,37$**

III.8.4 Dosage des granulats

Le volume des granulats s'écrit : $V_{\text{Granulats}} = 1000 - V_{\text{pâte}}$

Avec $V_{\text{pâte}} = V_C + V_E + V_F$

Posant $\rho_C = 3.15 \text{ Kg/m}^3$ et $\rho_F = 2.71 \text{ Kg/m}^3$ respectivement la masse volumique de ciment et de filler calcaire.

Le volume de pâte devient : $V_{\text{pâte}} = 320 \text{ l/m}^3$

Par conséquent $V_{\text{Granulats}} = 1000 - 320 = 680 \text{ l/m}^3$

$$S = V_{\text{Granulats}} \times S \% \times \rho_{s(S)} = 660 \times 0,50 \times 2,617 = 890 \text{ Kg/m}^3$$

$$G = V_{\text{Granulats}} \times G \% \times \rho_{s(G)} = 660 \times 0,50 \times 2,647 = 900 \text{ Kg/m}^3$$

II.8.5 Détermination du dosage de saturation sur coulis

Le point de saturation est défini par le dosage en superplastifiant au-dessus duquel le temps d'écoulement au cône de Marsh ne décroît plus d'une manière appréciable.

Les rapports F/F+C et E/L adoptés sont respectivement 0,326 et 0,37. Ces rapports qui permettent, sans adjuvant, l'obtention d'une pâte homogène et stable.

Le dosage de saturation est déterminé sur des coulis confectionnés par le mélange (ciment + filler calcaire). Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

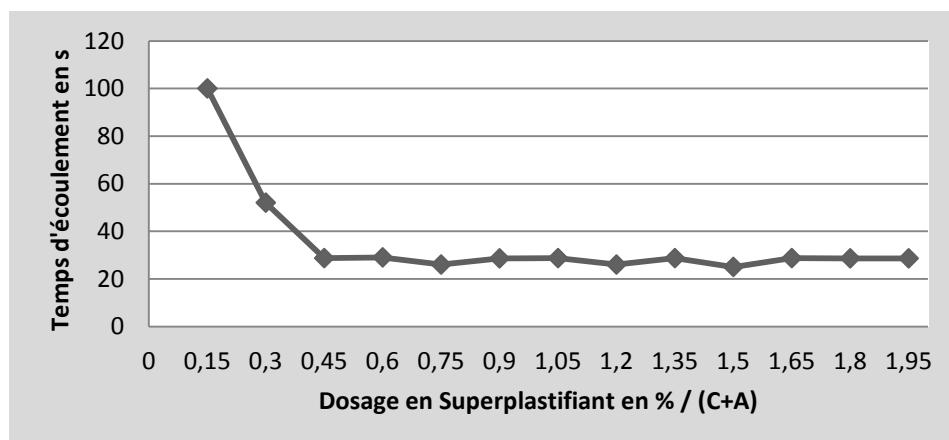


Fig. 69. Evolution du temps d'écoulement au cône de Marsh en fonction du dosage en superplastifiant.

Sur la figure 69, on peut déterminer le dosage de saturation du coulis. On remarque que ce dernier est de l'ordre de **0,45%** par rapport à la masse de [ciment + filler calcaire].

III.8.6 Valeurs limites à prendre en compte

Pour la classe d'exposition XF3, nous devons vérifier les valeurs limites indiqués par les normes (annexe 1) :

- $E/(C+kA) < 0,55$ (1)
- Teneur en liant équivalent $> 346,5 \text{ Kg/m}^3$ (2)

Dans notre cas :

- $E/(C+kA) = 0,37 < 0,55$
- Teneur en liant équivalent = $392,5 > 346,5 \text{ Kg/m}^3$

Ce qui vérifié bien les deux conditions (1) et (2)

- **Récapitulation du dosage au mètre cube**

BAP	superplastifiant		Ciment	Eau	Sable 0/2	Gravier 5/10	Filler calcaire	E/L
	SP%/L	SP (Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(l/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	(Kg/m ³)	-
-	0.45	9.75	350	147	890	900	170	0.37

Sur la base des résultats obtenus par les études élaborées sur les bétons autoplacants, cette démarche permet de définir plus rapidement des compositions qui répondent aux exigences de fluidité, de stabilité et de résistance nécessaires pour un béton autoplacant normalisé.

Remarque : Formulation des BHP & BFUP

La meilleure formulation des BAP, qui respecte à la fois les caractéristiques rhéologiques, et qui offre la plus grande résistance à la compression au jeune âge et aussi à 28 jours, va nous servir dans notre étude expérimentale comme base pour la formulation des « BHP ».

Pour le BFUP, la formulation de référence est celle dérivée de la meilleure formulation des BHP.

Pour une caractérisation rhéologique et mécanique complète de ces formulations voir l'AXE 3 « Exploitation et analyse des résultats ». Les résultats ont montré qu'il est possible de fabriquer un béton à haute performance et un béton fibré avec des matériaux locaux présentant les mêmes composants de base qu'un béton autoplaçant et permettant ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celles connues à l'échelle internationale.

En outre, si on peut considérer qu'un malaxage suffisant permet une répartition homogène des fibres dans le béton frais, les parois et, surtout, l'écoulement du béton orientent les fibres suivant des directions préférentielles ce qui engendre une forte anisotropie. De plus, pour certaines pièces, une grande hauteur de déversement du béton ou une forte vibration peuvent entraîner une ségrégation des fibres.

IV. Procédure de fabrication

La fabrication de chaque mélange se déroule comme suit:

- prémouillage du malaxeur ou de la bétonnière (fig.70) pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur,
- introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable, puis les fillers calcaires et pour finir le ciment.
- malaxage puis introduction de l'eau et des adjuvants conformément à la procédure indiquée à la figure 71.



Figure 70 : (a) malaxeur; (b) bétonnière

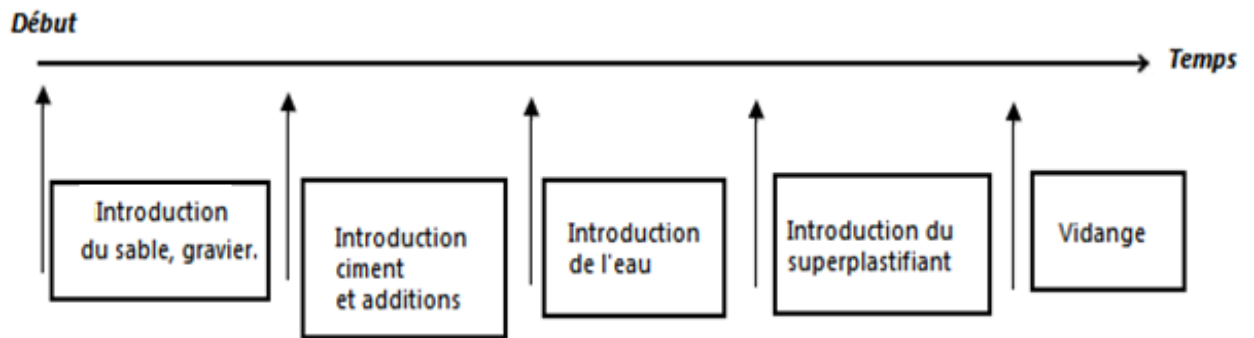


Figure 71 : temps de malaxage

Le malaxage du béton de fibres est important. En effet, il faut veiller à obtenir une bonne dispersion des fibres dans le mélange et éviter la formation de boules de fibres. Le Comité 544 de l'ACI [114] recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées et les matériaux recherchés :

- mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur (par exemple ajouter les fibres sur le tapis roulant d'alimentation des granulats) ;
- mélanger d'abord les gravillons et le sable, ajouter les fibres, puis le ciment et l'eau. Cette méthode est recommandée pour les fibres de polypropylène, de façon à les défibriller [115].
- ajouter les fibres en fin de malaxage et adopter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène.

Dans ce travail, on a mélangé d'abord les granulats et le sable, puis les fibres et enfin le ciment, les additions minérales, l'eau et le superplastifiant.

Une fois le béton formulé et fabriqué, il reste à le mettre en œuvre. Cette opération est fondamentale car elle conditionne les caractéristiques mécaniques du matériau [109-113].

V. Caractérisation d'écoulement des bétons : Nouvelle approche

Comme indiqué précédemment, les différents modèles rhéologiques confirment l'existence de relations entre les grandeurs spécifiques mesurées à travers les essais empiriques (étalement, etc...) et les caractéristiques rhéologiques (τ_0 , μ) des bétons fluides.

Cependant, selon Roussel [148], le résultat d'un essai d'étalement n'est représentatif du comportement rhéologique d'un béton que si l'échantillon est représentatif du matériau. Ceci impose d'une part que le volume de l'échantillon soit grand devant le volume élémentaire des plus grosses particules et d'autre part que les dimensions caractéristiques de l'écoulement (l'épaisseur de matériau dans le cas d'un écoulement comme celui généré par l'affaissement ou l'étalement d'une quantité donnée de matériau) soient grandes devant la taille des plus grosses particules composant le béton. La première condition est remplie : le volume du cône d'Abrams est approximativement 6 litres soit 5000 fois la taille des plus grosses particules (taille de l'ordre centimétrique). La deuxième condition n'est pas toujours remplie dans les tests d'étalement, elle impose que l'épaisseur au centre (épaisseur maximale) soit au moins 5 fois supérieure au diamètre du plus gros grain. Si cette condition n'est pas remplie, l'écoulement peut difficilement être considéré comme l'écoulement homogène d'un milieu continu. L'amélioration de ces concepts nécessite un nouvel essai rhéologique : Mesures rhéologiques à la boîte LCPC (fig. 72) – Roussel 2007 [185].



Fig. 72. Essai Boite LCPC.

Dans le cas de cet essai, si on change l'opérateur, le fait d'utiliser un seau peut perturber la vitesse ainsi que la manière d'écoulement de béton.

Outre les moyens expérimentaux classiques, dans notre étude on a utilisé un autre moyen de caractérisation rhéologique : c'est l'écoulement de béton dans un V-Funnel puis dans un canal horizontal en plexiglas (fig. 73).

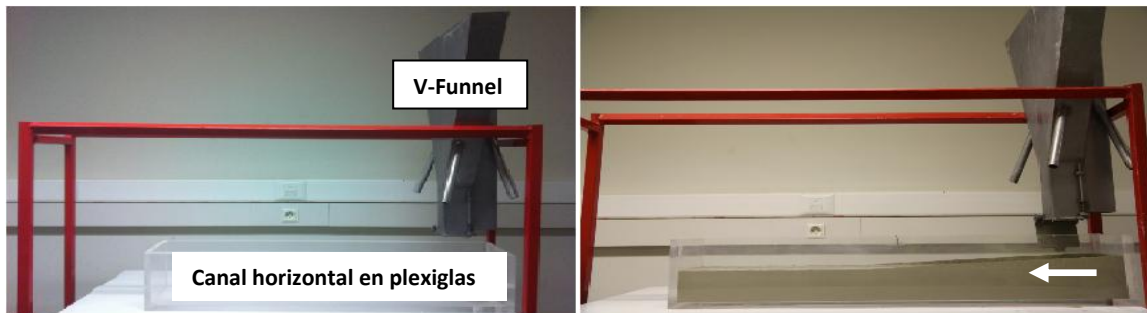


Fig. 73. Ecoulement des bétons dans un canal horizontal en plexiglas.

Par rapport à l'essai Boite LCPC, notre dispositif montre que : (1) quel que soit le comportement rhéologique de béton considéré, la vitesse d'écoulement reste la même (utilisation d'un V-Funnel normalisé); (2) quel que soit l'opérateur, la manière d'écoulement de béton reste aussi la même.

En outre, les essais rhéologiques les plus couramment utilisés pour caractériser le béton autoplaçant donnent une seule indication sur le comportement du béton, par exemple, le test de la boîte en L caractérise la capacité d'un béton frais à remplir un coffrage, l'essai d'étalement caractérise la capacité de remplissage du béton dans un milieu non ferrailé et le V-Funnel nous donne une indication sur la viscosité du béton en calculant le temps d'écoulement. L'avantage de notre test est donc de donner plusieurs indications en même temps : le temps d'écoulement dans le V-Funnel et dans le canal horizontal et la capacité de remplissage de béton tout en visualisant le profil d'écoulement. De plus, à chaque instant, nous pouvons déterminer le temps et le profil d'écoulement (fig. 74).

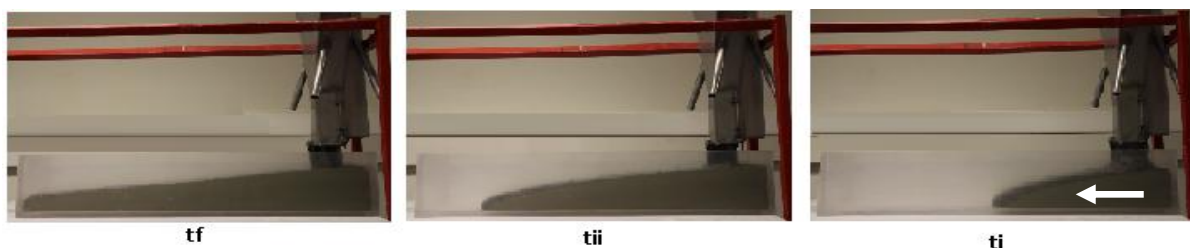


Fig. 74. Forme du profil à tout moment de l'écoulement.

Le dispositif expérimental utilisé est un canal horizontal en plexiglas de longueur $L_{max} = 0.90$ m, de largeur 0.20 m et de hauteur 0.16 m. Un volume de 12 litres de matériau est vidé dans un V-Funnel, puis dans un canal horizontal. Une minute environ après l'arrêt de l'écoulement, des photos sont prises à travers une des parois latérales du canal (fig. 75).

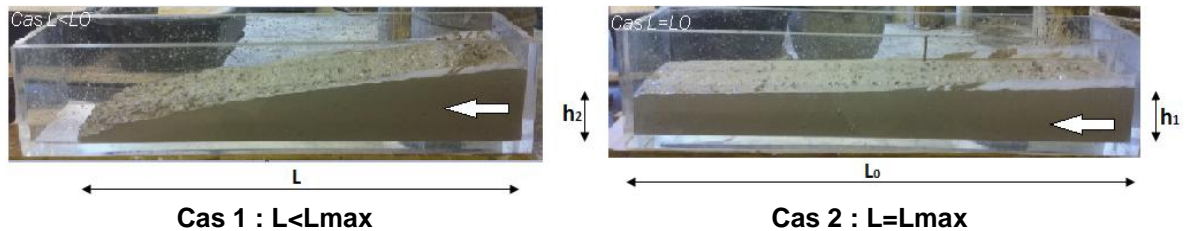


Fig. 75. Ecoulement des bétons dans un canal horizontal en plexiglas.

Par la suite, nous proposons une corrélation théorique entre la viscosité plastique du béton frais et le temps d'écoulement dans le V-Funnel et une corrélation entre la viscosité plastique et les caractéristiques du profil d'écoulement dans le canal horizontal en plexiglas, puis nous comparons cette solution théorique avec des mesures expérimentales et des mesures rapportées dans la littérature.

V.1 Calcul théorique de vitesse d'écoulement dans le V-Funnel

Le dispositif expérimental du test de V-Funnel est décrit sur la figure 76.

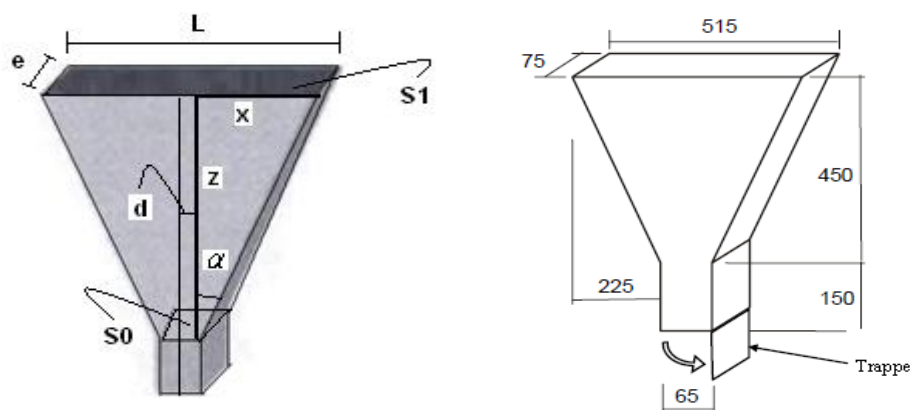


Fig. 76. Dimensions de V-Funnel

Où $S_0 = 2d.e$; $S_1 = Le$ avec $L = 2(d + x)$

Et $\tan \alpha = \frac{x}{z}$

D'où $S_1 = 2(z \cdot \tan \alpha + d) \cdot e$

Le bilan énergétique dans ce cas s'écrit :

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_0 + \rho g z_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \Delta P + \Delta H \quad (1)$$

Pendant l'ouverture de la trappe : $P_1 = P_0$; $z_0 = 0$

L'équation (1) devient :
$$\rho g z + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 + \Delta P + \Delta H \quad (2)$$

Où

ΔH : les pertes singulières $\Delta H = \frac{1}{2} \xi \rho v_1^2$; Avec ξ est le coefficient de pertes

ΔP : les pertes régulières dues au frottement visqueux (Pa).

Pour un fluide de type Bingham le débit total (décrit par l'équation de Buckingham-Reiner), en utilisant l'approche de Kaplan, 2000 [151], s'écrit:

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 H \mu_p} \left(1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 H \tau_0}{\Delta P R} \right) \right)$$

D'où

$$\Delta P = \frac{8 H \mu_p}{\pi} \left(\frac{Q}{R^4} \right) + \frac{8 H \tau_0}{3} \left(\frac{1}{R} \right)$$

Avec $R = \frac{Area}{perimeter} = \frac{(z \tan \alpha + d) \cdot e}{2(z \tan \alpha + d) + e}$ et $Q = S \cdot v = S_1 v_1 = v_1 \cdot 2(z \tan \alpha + d) \cdot e$

Posant :

$$R = \frac{(z \tan \alpha + d) \cdot e}{2(z \tan \alpha + d) + e} = \frac{a}{b} \quad \text{Et} \quad Q = 2 \cdot a \cdot v_1$$

Alors :
$$\Delta P = \frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{b^4}{a^3} \right) v_1 + \frac{8H\tau_0}{3} \left(\frac{b}{a} \right)$$

La conservation de la masse pour un fluide en écoulement se traduit par la

conservation du débit massique $S_1 \cdot v_1 = S_0 v_0$ avec: $v_0 = \frac{S_1}{S_0} v_1 = \frac{z \tan \alpha + d}{d} v_1$

L'équation (2) devient :

$$\rho g z + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^2 - \xi \right) - \frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{b^4}{a^3} \right) v_1 - \frac{8H\tau_0}{3} \left(\frac{b}{a} \right) = 0$$

D'où:
$$v_1^2 \left(\frac{1}{2} \rho \left(1 - \left(\frac{z \tan \alpha + d}{d} \right)^2 - \xi \right) \right) - \frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{b^4}{a^3} \right) v_1 - \frac{8H\tau_0}{3} \left(\frac{b}{a} \right) + \rho g z = 0 \quad (3)$$

On remplace a et b par ses valeurs, l'équation (3) devient :

$$v_1^2 \left(\frac{1}{2} \rho \left(1 - \left(\frac{z \tan \alpha + d}{d} \right)^2 - \xi \right) \right) - \frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]^4}{[(z \tan \alpha + d)e]^3} \right) v_1 - \frac{8H\tau_0}{3} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]}{[(z \tan \alpha + d)e]} \right) + \rho g z = 0$$

L'équation peut s'écrire sous la forme : $xv_1^2 + yv_1 + z = 0$

Avec

$$x = \frac{1}{2} \rho \left(1 - \left(\frac{z \tan \alpha + d}{d} \right)^2 - \xi \right); \quad y = -\frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]^4}{[(z \tan \alpha + d)e]^3} \right); \quad z = -\frac{8H\tau_0}{3} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]}{[(z \tan \alpha + d)e]} \right) + \rho g z$$

La solution de cette équation est (4):

$$v_1 = \frac{dz}{dt} = \frac{\frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]^4}{[(z \tan \alpha + d)e]^3} \right) - \sqrt{\left[\frac{16H\mu_p}{\pi} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]^4}{[(z \tan \alpha + d)e]^3} \right) \right]^2 - 4 \left[\frac{1}{2} \rho \left(1 - \left(\frac{z \tan \alpha + d}{d} \right)^2 - \xi \right) \right] \left[-\frac{8H\tau_0}{3} \left(\frac{[2(z \tan \alpha + d) + e]}{[(z \tan \alpha + d)e]} \right) + \rho g z \right]}}{\rho \left(1 - \left(\frac{z \tan \alpha + d}{d} \right)^2 - \xi \right)}$$

La résolution de cette équation différentielle nécessite l'utilisation d'un logiciel de calcul : dans notre cas on a utilisé le programme MATLAB, Méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 appropriée. La figure 77 montre un exemple de calcul.

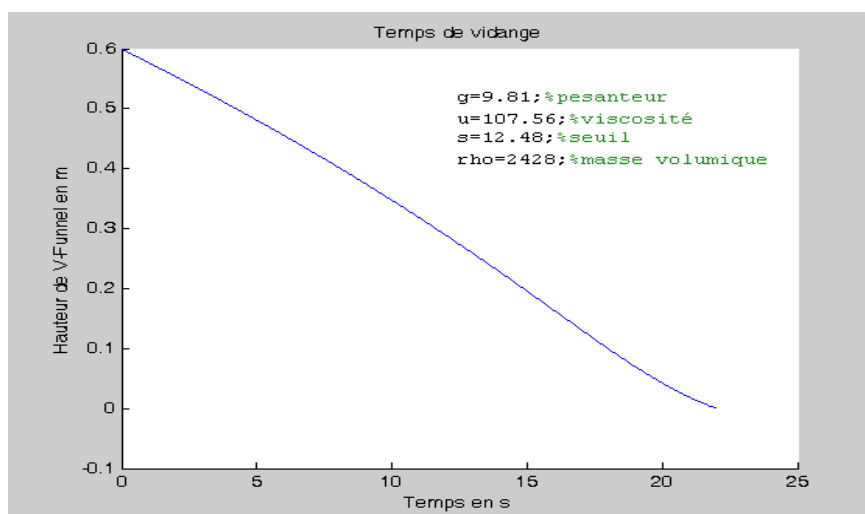


Fig. 77. Exemple de calcul : temps de vidange de V-Funnel en s

L'objectif principal de cette méthode est de déterminer la viscosité plastique de mélange à partir de mesures telles que le temps V-Funnel et la masse volumique (eq. 4). Pour vérifier la validité de cette méthode, plusieurs mortiers ont été préparés à l'aide de : superplastifiant Tempo 16, Filler calcaire Carmeuse, sable normalisé et ciment CEM I 52,5 R CE CP2 NF. Le rapport eau efficace/ciment a été maintenu constant à 0,5. Les proportions des mélanges sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 17. Composition des mortiers étudiés

Matériaux (Kg/m ³)	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M 7	M 8	M 9	M 10
Ciment	517	517	517	517	517	517	258.5	310.2	361.9	413.6
Filler calcaire	-	-	-	-	-	-	258.5	206.8	155.1	103.4
Eau	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258
Sable normalisé	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522	1522
Superplastifiant	-	2.15	4.30	6.45	8.60	10.75	1.075	1.075	1.075	1.075

Mesures

Masse volumique	2290	2180.2	2145.4	2160	2135	2208.6	2199.7	2202	2250	2263
Temps V-Funnel	12	4.7	4.0	3.4	3.2	2	7	7.3	7.6	8

Mesure rhéologiques

Seuil de cisaillement	-	77.02	22.82	20.83	13.72	0	115.76	117.21	118.69	132.94
Viscosité- rhéomètre	19.39	6.20	4.34	3.66	2.58	1.43	10.39	10.60	11.26	11.97
Viscosité- théorique	-	6.39	4.35	3.56	3.17	1.44	11.01	11.56	12.28	13.48

Le rhéomètre utilisé dans nos travaux est un rhéomètre R/S (fig. 81) fabriqué par Brookfield. Il fonctionne à la fois en vitesse imposée (Rate, en tr/min) et en contrainte imposée (Stress).

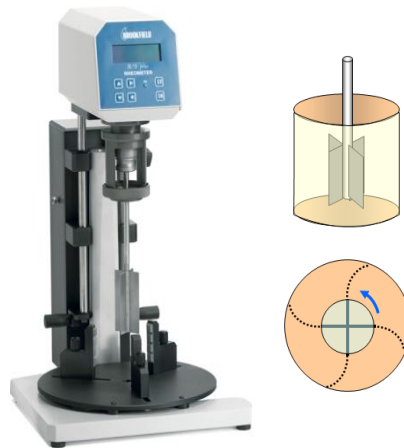


Fig. 81. Rhéomètre R/S

La comparaison entre la viscosité trouvée par le rhéomètre R/S et la viscosité calculée par notre approche est présentée dans la figure 78.

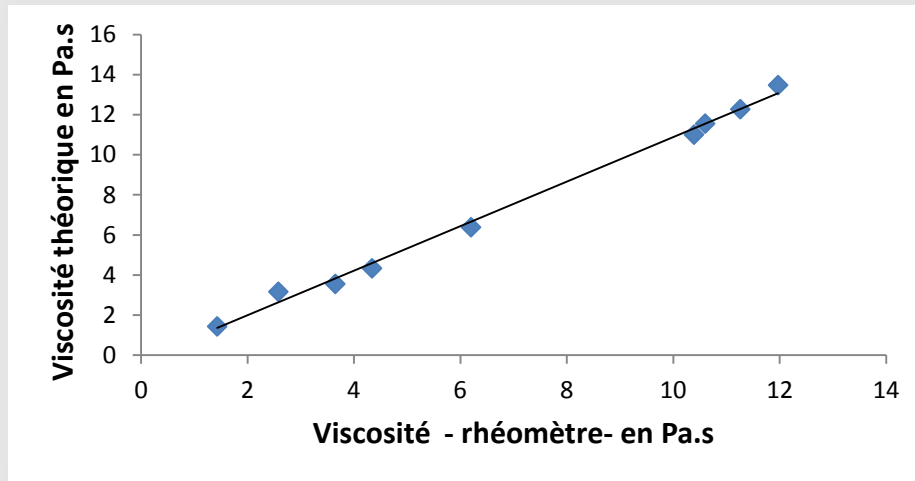


Fig. 78. La relation entre la viscosité théorique et la viscosité mesurée à l'aide du rhéomètre

Les premiers résultats montrent que les valeurs de la viscosité plastique calculées par notre approche (équation 4) et celles mesurées par un rhéomètre R/S sont très proches, comme le montre la figure 78. Ces résultats montrent qu'on peut utiliser le V-Funnel pour caractériser d'une manière claire la viscosité plastique de mortier.

En plus, pour vérifier la validité de cette méthode dans le cas des bétons, nous avons comparé les résultats obtenus par Chiara F. Ferraris et Lynn E. Brower [147] avec la viscosité calculée par notre approche.

Le tableau 18 présente les caractéristiques rhéologiques des bétons réalisés par Chiara F. Ferraris et Lynn E. Brower [147] et le tableau 19 montre les valeurs du seuil d'écoulement et de la viscosité mesurées par trois types de viscosimètres (BML, BTRHEOM, Two-point Test).

Tableau 18. Caractéristiques rhéologiques des bétons fabriqués par [147]

Bétons Notation [147]	Masse volumique (Kg/m³)	Etalement (mm)	T50 (s)	V-Funnel (s)
D1M3	2403	210	-	4
D1M4	2339	210	-	6.5
D1M5	2262	133	-	-
D2M1	2396	121	-	-
D2M2	2383	660	2	2.9
D2M3	2434	641	4.7	9.2
D2M4	2383	635	2.3	5.8
D2M5	2377	533	4.7	7.3
D2M7	2447	610	2.8	8.9
D3M1	2337	356	-	6.4
D3M2	2396	622	1.4	2.4
D3M3	2350	356	-	8.4
D3M4	2416	356	-	3.2
D3M5	2389	597	2.2	5.2
D3M6	2363	406	-	7.8

Tableau 19. Limite d'élasticité et viscosité plastique mesurés par trois types de viscosimètres

Bétons Notation	BML		BTRHEOM		Two-point Test	
	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)
D1M3	273	24	1005	103	534	30
D1M4	300	36	864	114	533	14
D1M5	528	28	1084	69	812	-
D2M1	584	32	1120	127	933	-
D2M2	39	22	324	100	198	54
D2M3	3	57	161	143	121	163
D2M4	30	38	491	102	30	98
D2M5	55	58	88	164	245	117
D2M7	38	55	158	138	155	107
D3M1	416	46	628	167	505	27
D3M2	35	17	283	52	71	46
D3M3	303	36	925	134	427	54
D3M4	290	23	670	105	451	44
D3M5	55	42	233	91	130	70
D3M6	235	39	687	71	268	74

La comparaison entre la viscosité trouvée par [147] et la viscosité calculée par notre approche est présentée dans la figure suivante (fig. 79).

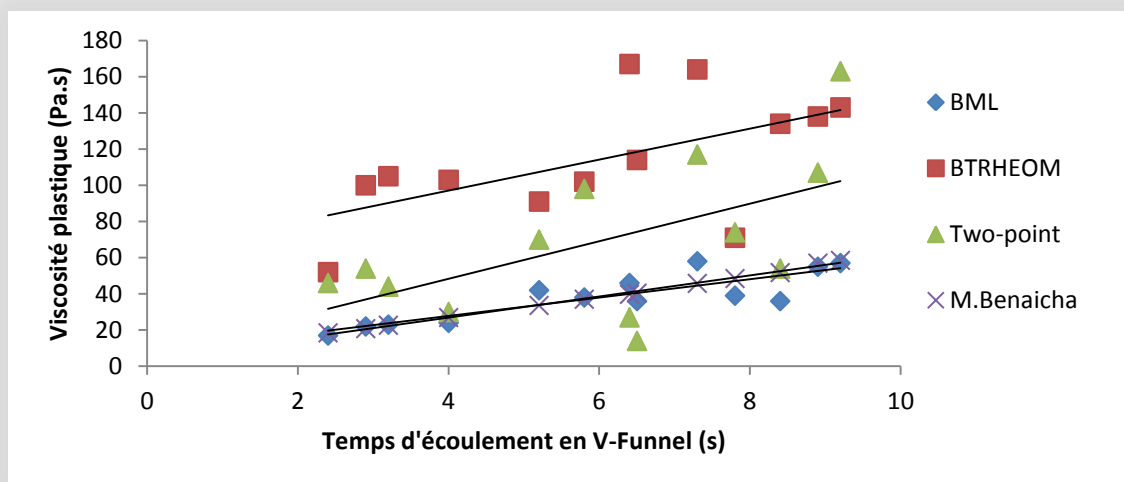


Fig. 79. Evolution de la viscosité plastique en fonction de temps d'écoulement en V-Funnel

Le graphe montre que les valeurs de la viscosité calculées par notre approche, et celles mesurées par Chiara F. Ferraris et Lynn E. Brower en utilisant le viscosimètre BML sont très proches. Ces résultats montrent qu'on peut utiliser le V-Funnel pour caractériser d'une manière claire la viscosité plastique de béton. La figure 80 présente la relation entre le temps V-funnel mesuré par [147] et le temps estimé par notre approche.

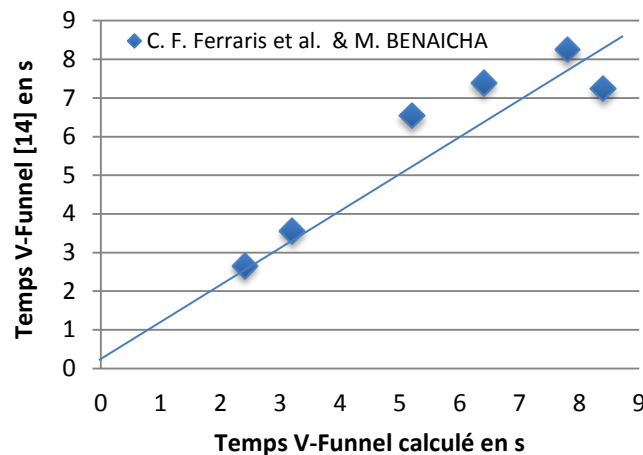


Fig. 80. Temps V-Funnel mesuré par Chiara F. Ferraris and Lynn E. Brower [147] et M.Benaïcha et al. [186].

Ces résultats montrent que les valeurs de temps V-funnel calculées par notre approche, sont proches de celles mesurées par Chiara F. Ferraris et Lynn E. Brower [147].

En outre, l'utilisation du canal horizontal en plexiglas nous donne une idée directe sur la capacité de remplissage d'un coffrage tout en visualisant le profil d'écoulement. En plus, on peut déterminer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du béton en n'utilisant que les caractéristiques géométriques du profil d'écoulement et le temps d'écoulement du béton dans le canal.

Concernant la relation entre le seuil d'écoulement et l'étalement les auteurs sont moins unanimes, alors que Emborg [156] ou Utsi et al, [155] trouvent une faible corrélation entre le seuil d'écoulement extrapolé par le modèle de Bingham et la mesure d'étalement, les résultats de Ferraris et de Larrard [122], obtenus sur BAP, montrent une bonne corrélation entre le seuil d'écoulement extrapolé par le modèle d'Herschel-Bulkley et l'étalement.

Cependant, comme il l'est mentionné ci-dessous, l'essai d'étalement présente quelques défauts et c'est pour cette raison que N. Roussel [148] a proposé une autre méthode pour déterminer le seuil d'écoulement de béton en fonction des caractéristiques d'écoulement dans le canal horizontal en plexiglas : selon le volume et le seuil d'écoulement du matériau testé, deux cas peuvent être observés : la longueur de l'écoulement peut être inférieure (Fig. 81.a) ou égale à la longueur du canal (Fig. 81.b). Le seuil de cisaillement est donné dans la figure 81.



$$\tau_0 = \frac{\rho g l_0}{2L} \left[h_1 + \frac{l_0}{2} \ln \left(\frac{l_0}{l_0 + 2h_1} \right) \right] \quad \tau_0 = \frac{\rho g l_0}{2L_0} \left[(h_1 - h_2) + \frac{l_0}{2} \ln \left(\frac{l_0 + 2h_2}{l_0 + 2h_1} \right) \right]$$

Fig. 81. Ecoulement en canal ; a) Cas $L < L_0$; b) Cas $L = L_0$

Où ρ la densité, l_0 la largeur du canal, $h(x)$ l'arrêt d'écoulement et g la pesanteur.

Nous sommes arrivés à proposer une corrélation entre la viscosité plastique du béton et le temps d'écoulement dans le V-Funnel. Par la suite, nous essaierons de trouver une autre relation entre la viscosité plastique du béton et les caractéristiques géométriques du profil d'écoulement et de temps d'écoulement dans un canal horizontal.

V.2 Calcul théorique de la viscosité plastique dans un canal horizontal

Considérons un béton de densité ρ émergé dans l'air de densité ρ_{air} . Le champ d'écoulement de béton dans le canal horizontal en plexiglas est présenté dans la figure suivante (fig.82) :

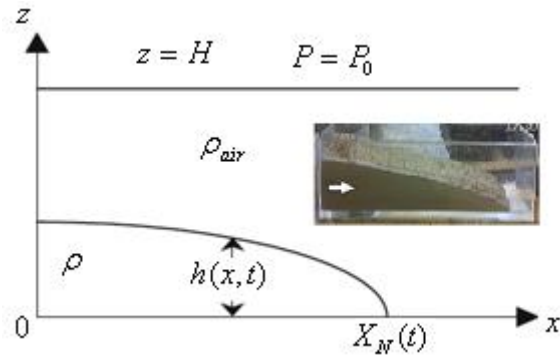


Fig. 82. Le croquis du champ d'écoulement et le système de coordonnées

Avec le système de coordonnées esquissé dans la figure 82, la pression est donnée par Huppert, H.E. [187]:

$$P = P_0 + \rho_{air} g(H - h) + \rho g(h - z) \quad (5)$$

L'équilibre entre le gradient de pression et les forces visqueuses /x est donc exprimée par:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Le modèle de comportement rhéologique le plus utilisé pour identifier la limite d'élasticité du béton est le modèle Binghamien : $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$

La première propriété (τ_0) est une mesure de la contrainte de cisaillement nécessaire pour amorcer l'écoulement et la seconde (μ) une mesure de la résistance des matériaux à couler après que le matériel commence à s'écouler. Ces deux propriétés rhéologiques sont donc nécessaires pour caractériser quantitativement l'écoulement de béton frais.

L'équation constitutive pour la contrainte de cisaillement d'un fluide Binghamien est [129, 188]:

$$\tau_{zx} = \tau_0 + \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (7)$$

Et les conditions aux limites :

$$u(x, z = 0, t) = 0 ; \quad \frac{\partial u(x, z = h, t)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Cette dernière condition implique que la contrainte de cisaillement dans la partie supérieure (sommet de profil) est très petite par rapport à sa valeur au sein de l'écoulement [189].

Substituant (5), (7) dans (6), la vitesse u devient :

$$(\rho - \rho_{air})g \frac{\partial h}{\partial x} - \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

(5) dans (6) :

$$u(x, z, t) = -\frac{1}{2} \frac{(\rho - \rho_{air})g}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x} z(2h - z) \quad (10)$$

La conservation de la masse (équation de continuité) prend la forme :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u(z, t) dz = 0 \quad (11)$$

En substituant (10) dans (11), nous obtenons :

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{3} \frac{(\rho - \rho_{air})g}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} (h^3 \frac{\partial h}{\partial x}) = 0 \quad (12)$$

L'équation (12) définit le problème avec l'équation de continuité globale, en précisant le volume total de béton libéré. À la fin d'écoulement, le volume libéré peut être considéré comme proportionnel au temps : $V = l_0 \int_0^{x_N} h(x, t) dx = Qt^\alpha$; avec α est une constante qui dépend la forme finale du profil (fig. 83).

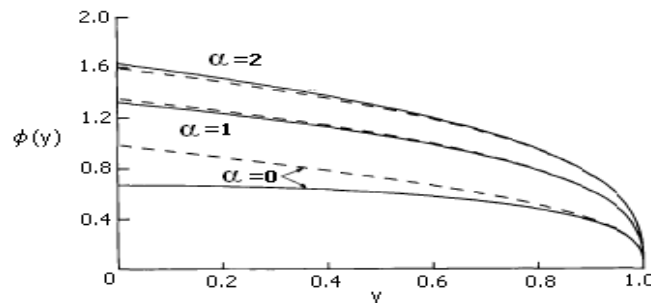


Fig. 83. La forme d'écoulement visqueux en deux dimensions pour $\alpha = 0, 1$ et 2 . Les lignes pointillées représentent les formes approximatives

En introduisant le variable de similarité donné par Huppert, H.E. [187]

$$\theta = \left(\frac{1}{3} \frac{(\rho - \rho_{air})g}{\mu} \left(\frac{Q}{l_0} \right)^3 \right)^{-1/5} x t^{-(3\alpha+1)/5} \quad (13)$$

La longueur d'écoulement devient:

$$L = X_N(t) = \theta_N \left(\frac{1}{3} \frac{(\rho - \rho_{air})g}{\mu} \left(\frac{Q}{l_0} \right)^3 \right)^{1/5} t^{(3\alpha+1)/5} \quad (14)$$

Où θ_N est la valeur de θ en x_N ;

Dans notre cas : $V = Qt$, c'est-à-dire, $\alpha = 1$. En utilisant l'approche de PATTLE, 1959 [190] (fig. 84) : pour $\alpha = 1$ la valeur de θ_N est ≈ 1

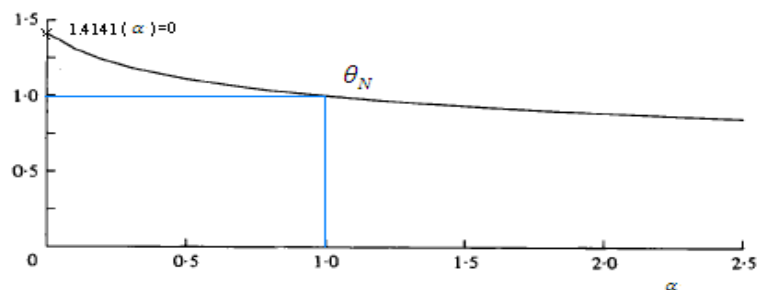


Fig. 84. Les valeurs de θ_N en fonction de α

D'où, à partir de l'équation 14, la viscosité plastique devient :

$$\mu \approx \frac{1}{3} (\rho - \rho_{air}) g \left(\frac{Q}{l_0} \right)^3 (L t^{-4/5})^{-5} \quad (15)$$

La validation pratique de cette équation est présentée par la suite : en tenant compte des suggestions rapportées dans la littérature concernant la proportion de mélange de béton autoplçant [191,192], la phase préliminaire consiste à formuler des bétons autoplçants à partir de ciment CEM II/B LL 32,5 R tout en faisant varier le type de superplastifiant et le dosage en filler calcaire et en fumée de silice. La quantité de liant est de l'ordre de 470 Kg/m^3 . Les proportions des mélanges sont présentées dans le tableau 20. Tous les bétons ont été préparés avec le même rapport E/L de 0,34.

Tableau 20 : Proportions des mélanges (en fonction du type de superplastifiant) pour 1 m3 de BAP.

Matériaux (Kg/m ³)		BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	BAP 5	BAP 6	BAP 7	BAP 8
Ciment		305,5	258,5	428	305,5	258,5	428	305,5	258,5
Filler calcaire		164,5	211,5		164,5	211,5		164,5	211,5
Fumée de silice				42,8			42,8		
Eau		160	160	160	160	160	160	160	160
Sable 0/2		876	870	870	874	868	870	870	864
Gravier 6,3/10		900	900	900	900	900	900	900	900
Superplastifiant	KRONO 20	3,44	3,44	3,44		-		-	
	TEMPO 9	-		-	4,27	4,27	4,27	-	
	TEMPO 16	-		-		-		5,88	5,88
% SP		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Les résultats des essais permettant de caractériser le comportement des bétons autoplacants fabriqués lors de cette étude sont regroupés dans le tableau 21.

Tableau 21 : caractéristiques rhéologiques des BAP.

Mélanges		BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	BAP 5	BAP 6	BAP 7	BAP 8
Essai d'étalement	\varnothing_{fin} (mm)	615	740	617,5	620	700	555	690	700
	t_{500} (s)	3	2	7	2,5	2	6	3,5	2,5
Essai V-Funnel	t(s)	15	15	29	15	11	27	12	11
Boite en L (H2/H1)	ΔH_{fin} (mm)	0,34	0,86	0,7	0,8	0,85	0,5	0,81	0,89
Stabilité au tamis	SR(%)	1	1,66	8	6,25	7,77	5,02	5,62	12,29

Analyse de Canal en plexiglas	Longueur d'écoulement (mm)	855	865	865	845	865	860	865	865
	Hauteur initiale (mm)	100	75	73	95	75	90	80	80
	Hauteur finale (mm)	0	50	42	0	50	0	45	55

Selon les recommandations de l'AFGC et la norme NF EN 12350, avec un étalement supérieur à 600 mm, un gradient de remplissage (H_2/H_1) supérieur à 0.80, un taux de ségrégation inférieur à 15%, un temps d'étalement t_{500} inférieur à 5 s et un temps d'écoulement en V-Funnel inférieur à 14 s, les caractéristiques rhéologiques ci-dessus (tableau 21) montrent que les BAP5, BAP7 et BAP8 satisfont aux conditions requises pour être qualifiées de béton autoplaçant.

Les réponses des tests de modélisation rhéologique (l'écoulement de béton dans un V-Funnel puis dans un canal horizontal en plexiglas) réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau 22 et la figure 85.

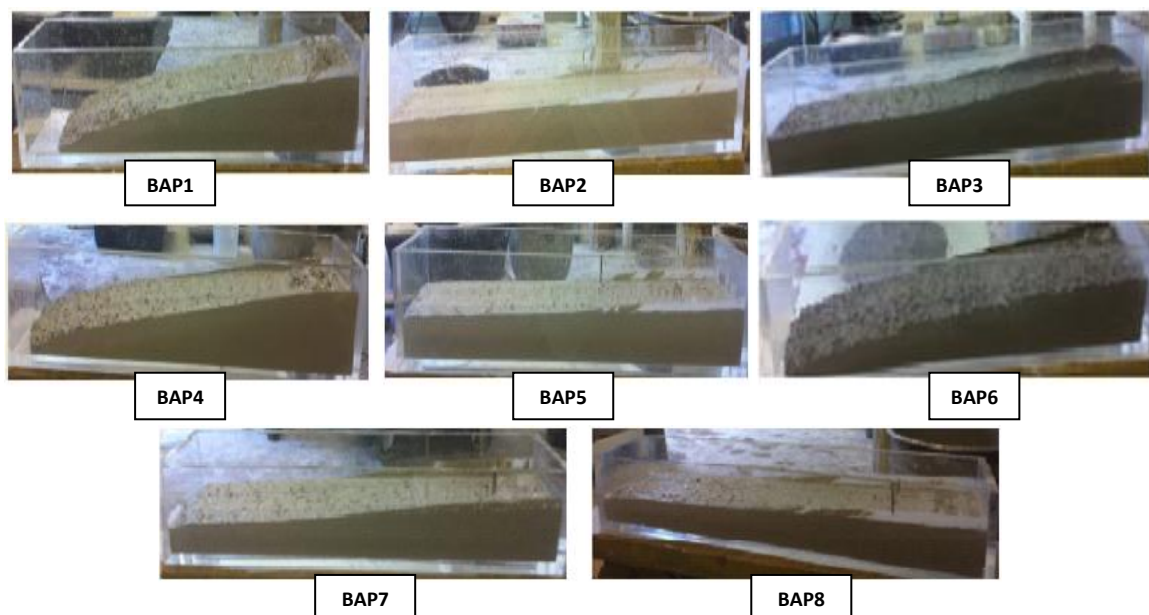


Fig. 85. Ecoulement des BAP dans le canal horizontal en plexiglas

La visualisation de profil d'écoulement nous donne une idée claire sur le seuil de cisaillement des bétons autoplaçants. À titre comparatif, l'utilisation de ce test permet de caractériser rhéologiquement les bétons considérés. La figure 89 montre

que les bétons BAP2, BAP3, BAP5, BAP7 et BAP8 possèdent une longueur d'écoulement égale à L_{max} , alors que les bétons BAP1, BAP4 et BAP6 présentent un gradient de remplissage inférieur aux autres bétons. Cette remarque est confirmée par les valeurs de seuil de cisaillement présentées dans le tableau suivant (tableau 22).

Tableau 22 : Mesures du seuil de cisaillement et de la viscosité des BAP.

Bétons	Mesures théoriques		
	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité - V-Funnel (Pa,s) Equation 4	Viscosité - canal horizontal (Pa,s) Equation 15
BAP1	79,44	93,19	90,68
BAP2	24,39	92,80	85,31
BAP3	39,54	183,88	169,62
BAP4	75,83	95,44	98,50
BAP5	25,04	70,34	64,23
BAP6	67,18	168,25	159,73
BAP7	34,35	85,28	78,88
BAP8	25,45	68,42	62,48

Le tableau 22 montre que les bétons BAP1, BAP4 et BAP6 possèdent des seuils de cisaillement supérieurs à 66 Pa, alors que les seuils des autres bétons ne dépassent pas 40 Pa. La figure suivante (fig. 86) présente les paramètres qui influencent le seuil de cisaillement.

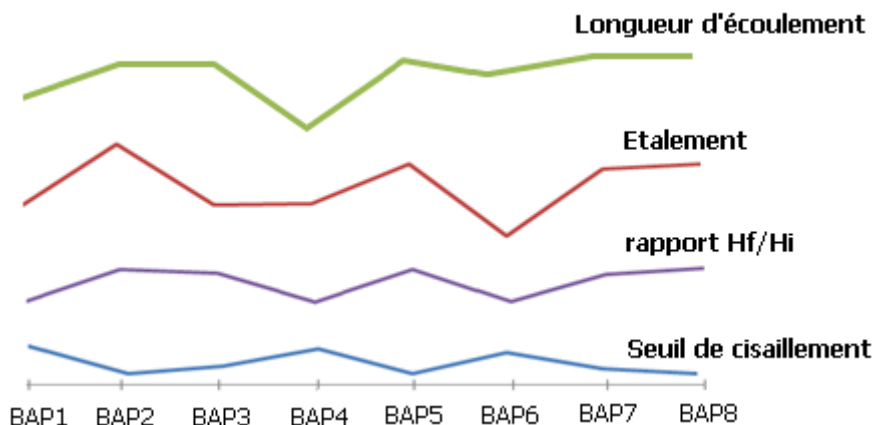


Fig. 86. Évolution du seuil de cisaillement en fonction des paramètres rhéologiques.

La figure 86 montre que le rapport H_f/H_i , la longueur d'écoulement et l'étalement augmentent quand le seuil de cisaillement diminue.

En outre, les caractéristiques rhéologiques ci-dessus (tableau 22) montrent que les BAP fabriqués avec la fumée de silice (BAP3 et BAP 6) possèdent une valeur de viscosité supérieure à 150 Pa.s, alors que la viscosité des autres bétons ne dépasse pas 96 Pa.s. Pour comprendre cette évolution, la figure suivante (fig. 87) montre la variation de la viscosité en fonction du temps d'écoulement en V-Funnel.

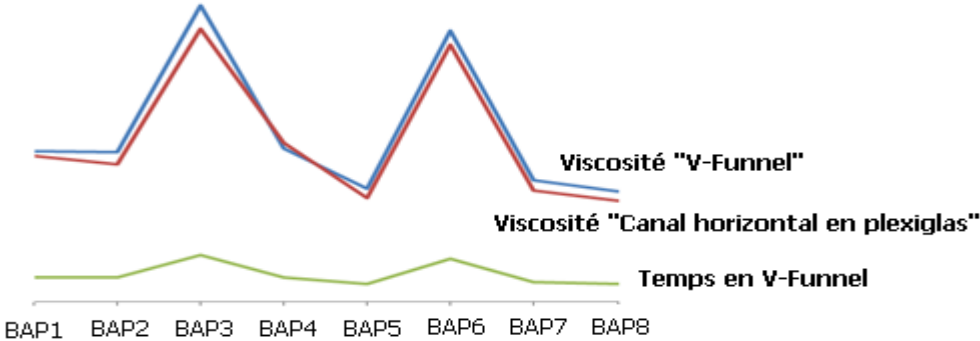


Fig. 87. Évolution de la viscosité en fonction de temps d'écoulement en V-Funnel

La figure 87 montre que la viscosité de béton augmente quand le temps dans le V-Funnel augmente. Dans le cas de BAP3 et BAP6 le temps d'écoulement dépasse 26 secondes (tableau 21) ce qui explique l'augmentation de la viscosité dans le cas de ces bétons.

Par la suite, on va comparer les valeurs de la viscosité trouvées en utilisant le V-Funnel (équation 4) avec celles trouvées en utilisant le canal horizontal (équation 15). Voir figure 88.

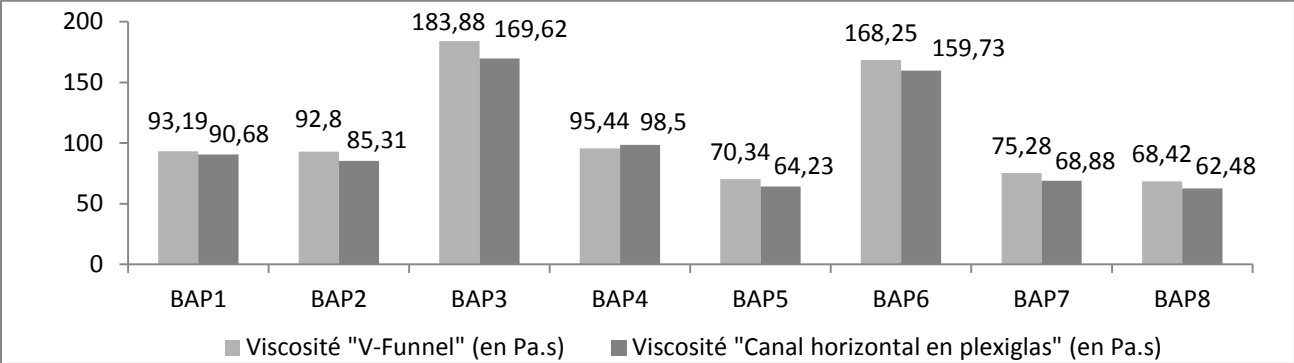


Fig. 88. Comparaison entre la viscosité calculée dans le V-Funnel et la viscosité calculée dans le canal horizontal

La figure 88 montre que les valeurs de deux viscosités sont très proches. La différence entre les deux valeurs ne dépasse pas 9 Pa.s sauf pour le BAP 3 où la différence entre les deux viscosités dépasse 14 Pa.s (ce béton présente un temps d'écoulement en V-Funnel de l'ordre de 29 secondes). D'une manière générale, pour les bétons autoplaçants qui représentent un temps d'écoulement dans le V-Funnel inférieur à 25 secondes nous avons presque les mêmes valeurs de viscosité pour les deux méthodes de calcul.

D'une manière pratique et pour les bétons qui satisfont aux conditions requises pour être qualifiés de béton autoplaçant, on peut généraliser la méthode de détermination des valeurs du seuil de l'écoulement et de la viscosité plastique dans les abaques suivants (fig. 89 et 91) :

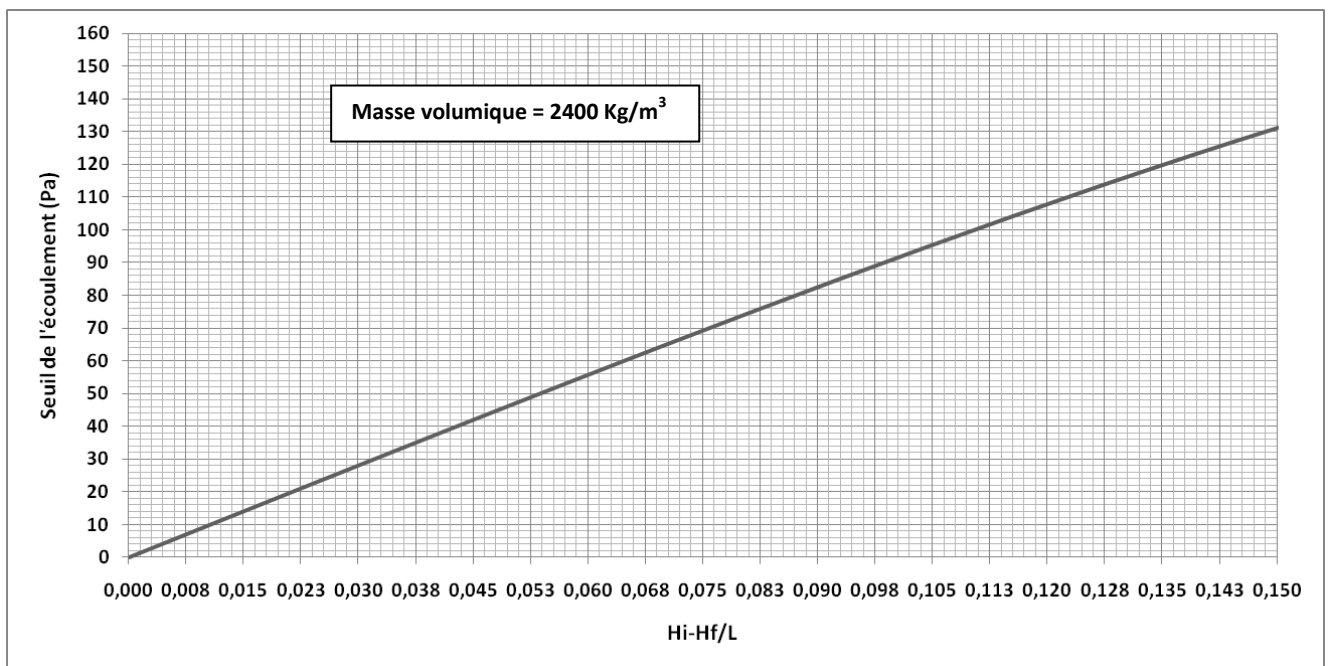


Fig. 89. Abaque de seuil en fonction des caractéristiques de profil d'écoulement

D'une manière générale le seuil τ_0 s'écrit : $\tau_0 = \tau_{0i} + x$. Pour déterminer le coefficient « x » on utilise le graphe suivant :

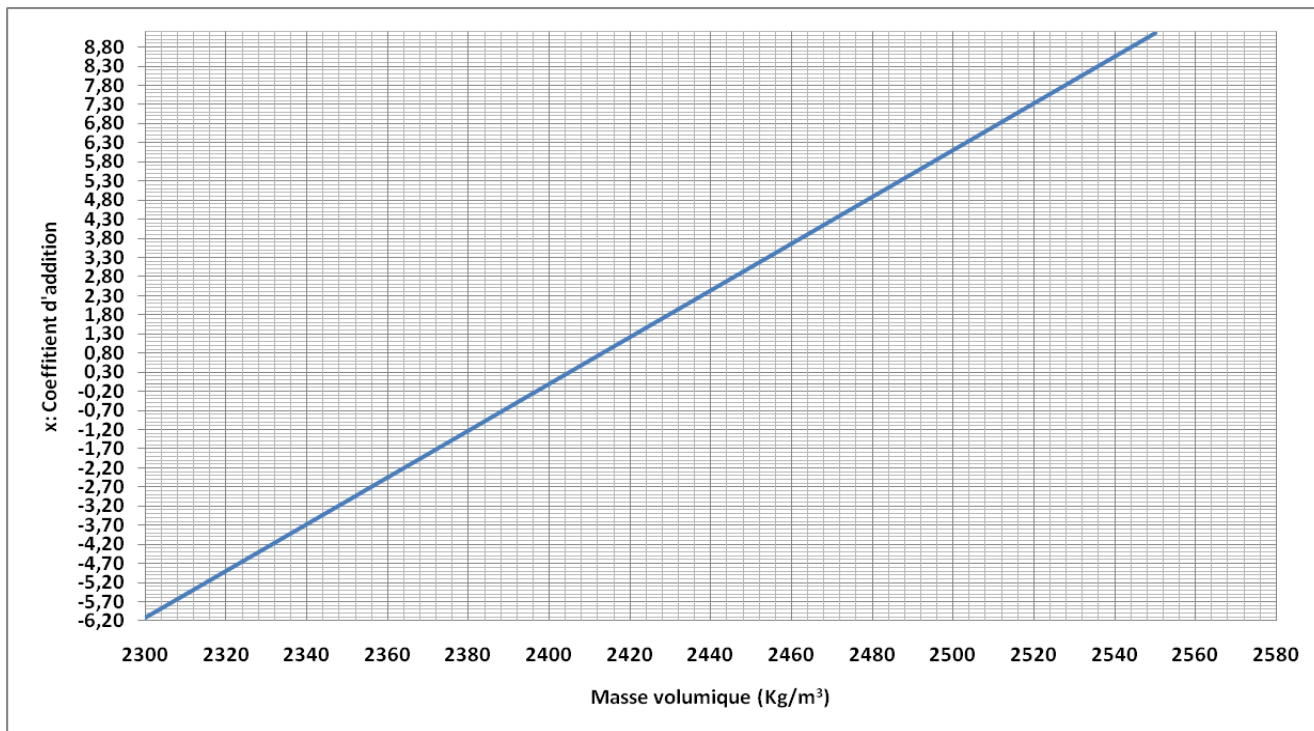


Fig. 90. Valeurs de « x » en fonction de la masse volumique

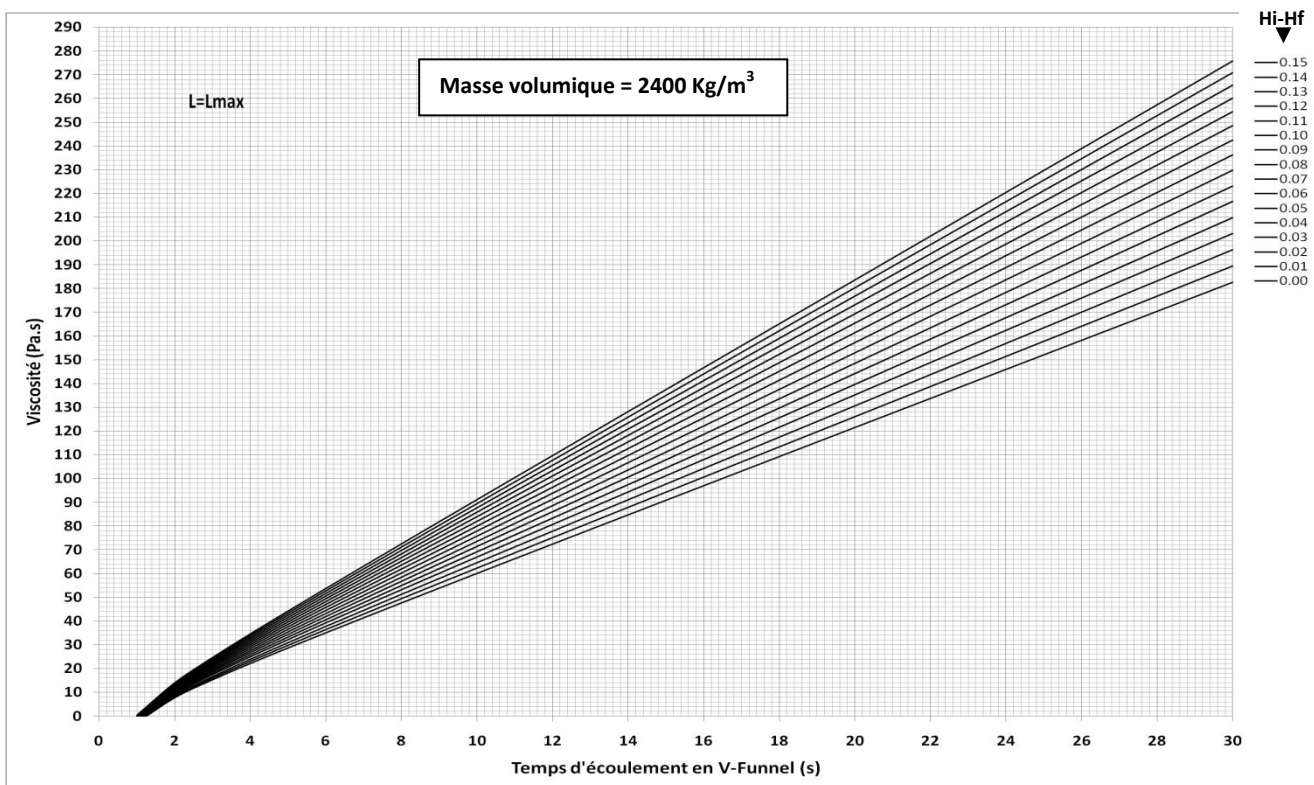


Fig. 91. Abaque de viscosité en fonction de temps d'écoulement dans le V-Funnel

D'une manière générale, la viscosité v s'écrit : $v = v_i + y$. Pour déterminer le coefficient « y » on utilise le graphe suivant :

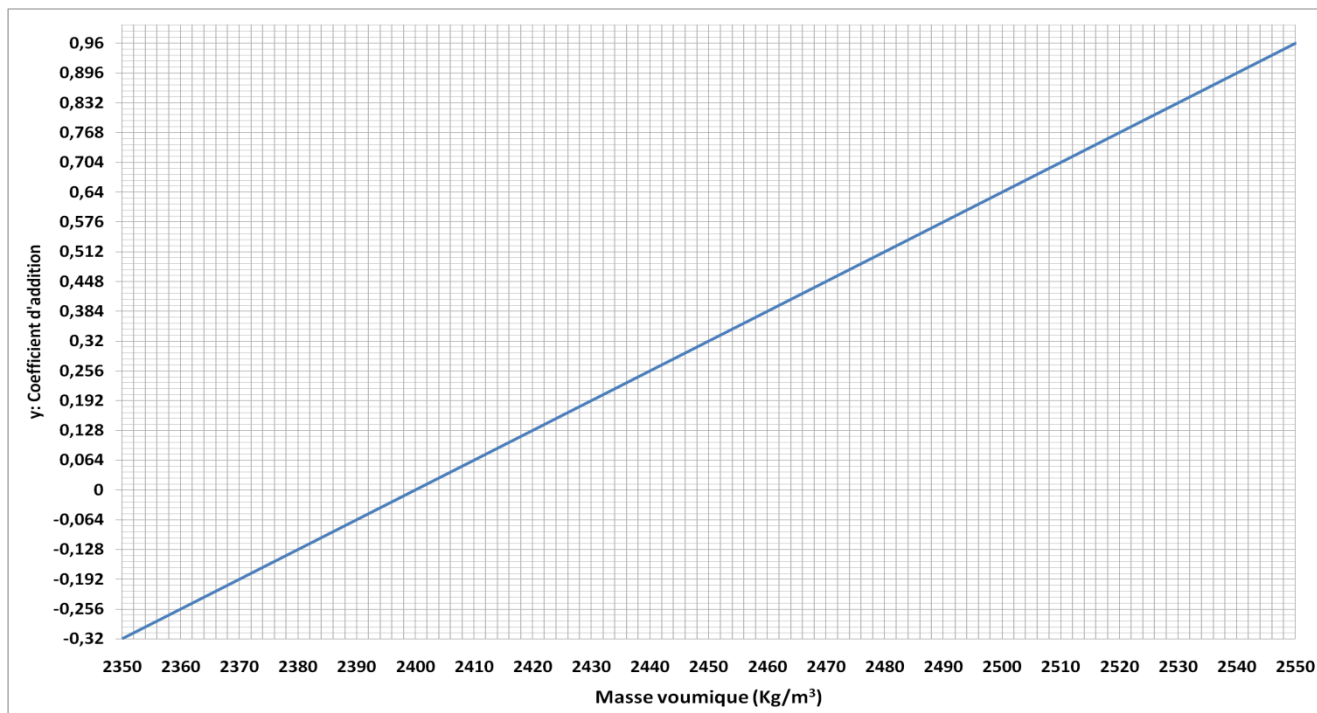


Fig. 92. Valeurs de « y » en fonction de la masse volumique

Sous la lumière des résultats des essais que nous avons réalisés selon notre procédure sur un ensemble de plus de 20 compositions différentes on peut conclure que :

- les abaques proposés sont des moyens très simples qui permettent la détermination directe de la viscosité plastique des BAP.
- les bétons dont les valeurs de seuils de cisaillements sont inférieures ou égales à 35 Pa et des viscosités inférieures ou égales à 85 Pa.s satisfont aux conditions requises pour être qualifiés de béton autoplaçant (selon les résultats de tableaux 21 et 22).

En résumé, nous sommes arrivés à proposer une corrélation entre la viscosité plastique du béton autoplaçant et le temps d'écoulement dans le V-Funnel et les caractéristiques rhéologiques du profil d'écoulement dans le canal horizontal. L'approche proposée (eq. 4 et eq. 15) a été vérifiée par des résultats expérimentaux. Nous disposons maintenant d'un outil expérimental permettant de caractériser de l'écoulement du béton à partir de ses caractéristiques rhéologiques (ex. temps V-Funnel, longueur d'écoulement, etc.).

À partir du mélange obtenu, ses propriétés rhéologiques devraient répondre, en même temps, à la demande d'ouvrabilité suffisante et aucune ségrégation. Comparé à ceux des bétons conventionnels, les propriétés rhéologiques des nouveaux bétons (BAP, BTHP fluide, BFUP) ont des valeurs, pour la limite d'élasticité et la viscosité plastique, inférieures. Il faut procéder alors à différents essais afin de caractériser ces bétons confectionnés et de vérifier qu'il n'y a pas une hétérogénéité ou un ressuage des bétons. Pour cela, nous utilisons les tests suivants.

VI. Etude de la remontée d'eau sur une surface verticale

Parmi les formes les plus courantes de ségrégation, il faut mentionner : les «nids de gravier» : concentrations locales de gros granulats et les «remontées d'eau» : eau séparée ou excédentaire remontant le long des faces verticales.

Dans le deuxième cas, les grains ont un mouvement d'ensemble vers le bas. Ce mouvement force l'eau intergranulaire à percoler vers le haut. Ainsi, une fois le béton mis en place dans son coffrage, une pellicule d'eau claire apparaît progressivement à sa surface. La sédimentation des grains est très lente, par conséquent le débit d'eau ressuée est modeste.

Ainsi, la pellicule d'eau ne sera visible que si le débit d'évaporation à la surface du béton est inférieur au débit d'eau ressuée.

La caractérisation expérimentale du ressuage pose un véritable problème. Deux familles de méthodes se distinguent : celles consistant à prélever l'eau ressuée et à quantifier son volume, et celles se bornant à mesurer le tassement du squelette granulaire. Plusieurs auteurs : Clear & Bonner 1988 [195], Powers 1968 [196], Khayat & Guizani 1997 [197] trouvent une différence notable entre les résultats obtenus par ces deux types de méthodes. La mesure du tassement étant toujours inférieure à celle par prélèvement d'eau.

Dans nos travaux on s'intéresse à la mesure directe du volume d'eau ressuée (fig. 93).

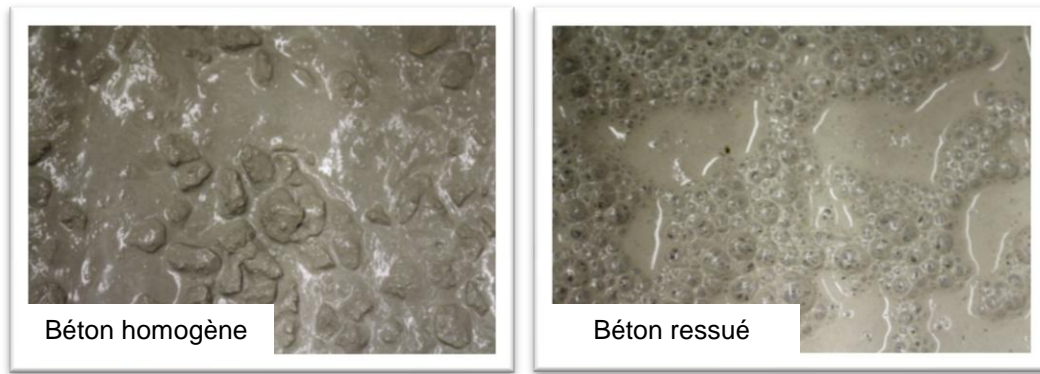


Fig. 93. Remontée d'eau sur une surface verticale

La première idée est soit de mesurer le volume d'eau ressuée en place, ce qui n'est pas toujours évident, soit d'effectuer un prélèvement pour le mesurer à part. Ce type de mesure est plutôt destiné au laboratoire. En effet, il n'est pas très facile de mesurer le volume d'eau ressuée d'un voile de béton de 3 ou 4 mètres de longueur. En fait, si l'on sait prédire correctement les effets d'échelle, la mesure du ressuage dans un moule de dimension réduite permettra la prédiction du ressuage à l'échelle réelle. La méthodologie proposée et utilisée pour l'étude des différents mélanges présentés dans ce travail est inspirée de la méthode ASTM C232 [198]. Les différentes étapes de l'essai proposé sont présentées dans ce qui suit et sont illustrés par la figure 94:

- le moule utilisé est un poteau de dimension 16 x 16 x 70 cm.
- le béton est coulé dans le poteau en une seule opération, puis le temps d'attente est estimé à 3 heures.
- Mesure de la hauteur de béton cisailé par une règle, notée "e"
- Prélèvement de l'eau ressuée par une seringue, notée "Ve"
- L'indice de ressuage « IR » est défini comme suit :

$$IR = \frac{V_e}{V_t}$$

Avec: V_t est le volume total de béton testé.

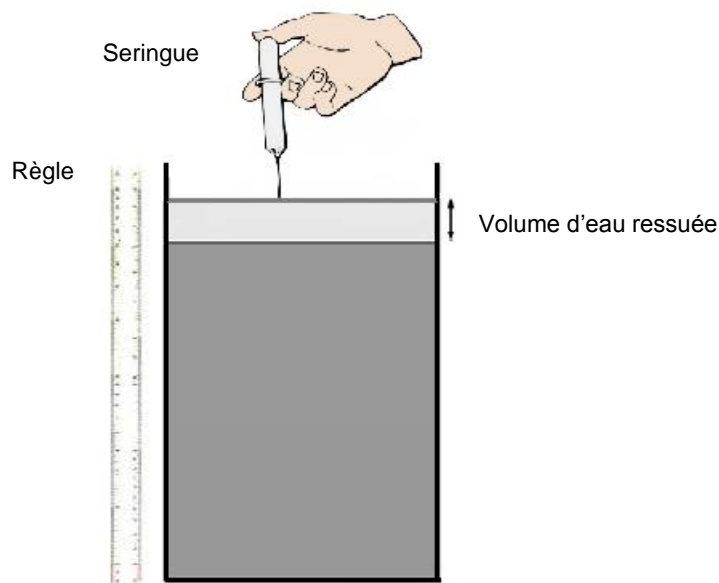


Fig. 94. Séparation et accumulation d'eau due au ressuage dans le béton

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton, mais ce protocole ne peut donner qu'un ordre de grandeur du ressuage obtenu.

Par la suite, et entre plusieurs bétons, on recherchera si l'air occlus, mesuré par un aéromètre, n'aurait pas un rôle majeur dans l'explication de cette différence.

Dans nos travaux on s'intéresse à la mesure directe du volume d'eau ressuée, puis on mesure l'indice de ressuage « $IR = V_e / V_t$ ». L'évolution du « IR » en fonction de la résistance à la compression, à 1 jour, à précisée afin de mieux comprendre l'influence du ressuage sur l'aspect mécanique de béton.

VI.1 Procédure expérimentale

On procède en plaçant une certaine quantité de matériaux (12 litres) grâce à un V-funnel dans un canal vertical gradué tel qu'indiqué sur la figure 95. Ensuite, la hauteur d'eau surnageante est suivie et reportée à 3h et à chaque heure jusqu'à l'obtention d'une hauteur constante. Le canal est scellé à son ouverture à l'aide d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le taux de ressuage ou l'indice de ressuage correspond au rapport du volume enregistré à chaque mesure sur le volume initial du canal. Les détails de l'expérience sont présentés dans la figure suivante :

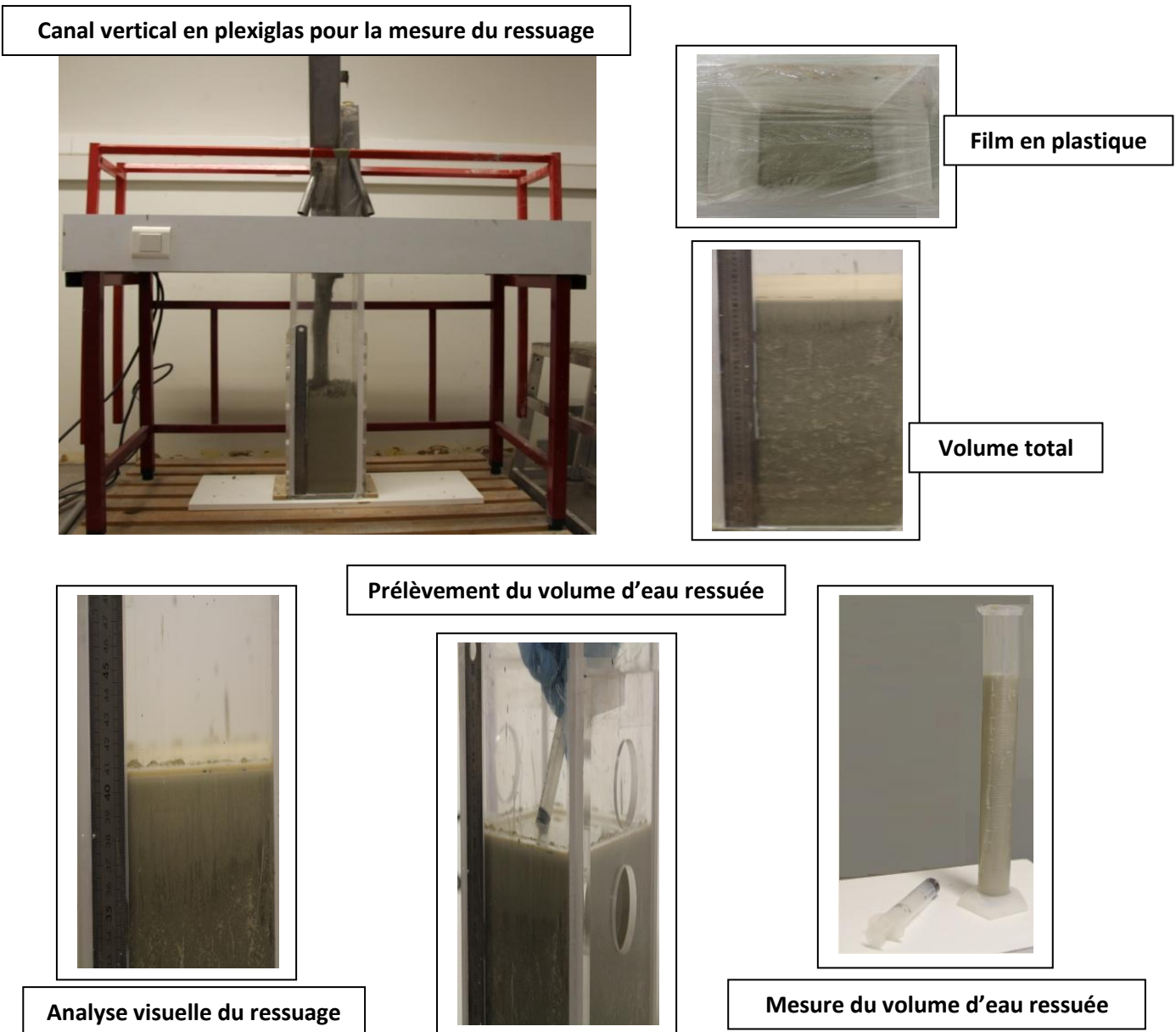


Fig. 95. Procédure expérimentale : Accumulation d'eau due au ressuage dans le béton

L'objectif est de valider la procédure expérimentale présentée précédemment et de situer les résultats obtenus par rapport aux résultats des essais recommandés.

En adoptant comme paramètres d'étude le dosage en superplastifiant et le dosage en eau exprimé par « Eau/Liant », sept compositions ont été définies.

Ainsi, pour tous les mélanges, on a défini un indice de ségrégation et réalisé l'ensemble des mesures suivantes :

- l'étalement,
- la stabilité au tamis,
- l'essai d'écoulement en V-Funnel

Pour chaque mélange étudié, lors des différents essais, des appréciations visuelles de la stabilité du béton sont notées.

Le tableau 23 regroupe les compositions des différents mélanges étudiés.

Tableau 23: Compositions des mélanges réalisés

Réf.	Compositions								
	Superplastifiant			Ciment (Kg /m ³)	Eau (l /m ³)	Sable (0/2) (Kg /m ³)	Gravier (5/10) (Kg /m ³)	Filler Calcaire (Kg /m ³)	E/L
	Type	%SP/L	(Kg /m ³)						
BAP R1	T16	0,225	4,87	350	147	890	900	170	0,37
*BAP réf.	T16	0,45	9,75	350	147	890	900	170	0,37
BAP R2	T16	0,6	13	350	147	890	900	170	0,37
BAP R3	T16	0,7	15,17	350	147	890	900	170	0,37
BAP R4	T16	0,8	17,33	350	147	890	900	170	0,37
BAP R5	T16	0,90	19,5	350	147	890	900	170	0,37
BAP R6	T16	0,45	19,5	350	176	830	840	170	0,45

* BAP réf. : béton formulé par notre approche. Voir l'axe 2

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 24.

Tableau 24 : Caractérisation rhéologique et étude expérimentale de ressuage

Réf.	Etalement (cm)	Stabilité au tamis (%)	V- Funnel (s)	Résistance à 1 j (MPa)	Teneur en air (%)	Etude de la ségrégation			Appréciation Visuelle
						Vt (l)	Ve (l)	IR (%)	
BAP R1	50	1,25	36	25	1,5	12	0	0	++
BAP réf.	72,5	8,8	13	46	0,9	12	0	0	++
BAP R2	74	14,8	12	36	1,3	12	$6,4 \cdot 10^{-5}$	0,32	+
BAP R3	75	20	12	33	0,6	12	$4,60 \cdot 10^{-5}$	0,38	+
BAP R4	79	40	11	24	0,5	12	$3,84 \cdot 10^{-5}$	0,53	±
BAP R5	81	43,3	11	19	0,3	12	$7,68 \cdot 10^{-5}$	0,64	-
BAP R6	83,5	51,2	9	13	0,35	12	$1,012 \cdot 10^{-4}$	0,85	--

Appréciation Visuelle de la stabilité : ++ très bonne, + bonne, ± Critique, - Mauvaise, -- très mauvaise

Un exemple d'appréciation visuelle est donné par la figure suivante (fig. 96):

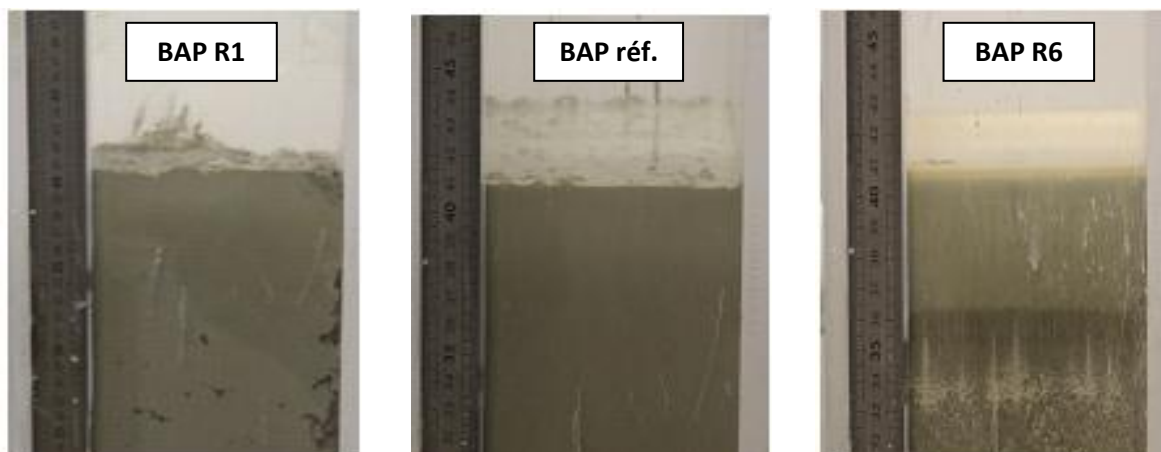


Fig. 96. Analyse visuelle du ressuage

Selon les recommandations de l'AFGC un béton autoplaçant devrait présenter à la fois un étalement supérieur ou égal à 60, un temps V-Funnel inférieur ou égal à 14 s et une stabilité au tamis inférieur à 15%. Quand la stabilité au tamis est entre 15 et 30% la stabilité est jugée critique et il est nécessaire de procéder à des essais spécifiques de ségrégation [11, 199].

En premier lieu, tous les bétons étudiés ont présenté des étalements supérieurs à 60 cm et des temps V-Funnel inférieurs à 14 (sauf le BAP R1). Ce qui permet de constater que l'ensemble de ces bétons présente une fluidité acceptable et ne présente pas de risque de blocage. Le point essentiel donc à vérifier pour l'ensemble de ces bétons est le ressuage et la ségrégation statique.

L'appréciation visuelle de nos bétons (en matière de stabilité, de ressuage et de ségrégation) lors des différents essais, a permis de constater la bonne stabilité de tous les bétons dont la valeur au tamis était inférieure ou égale à 15%. Il s'avère que tous ces bétons ont présenté un IR inférieur à 0.40%. C'est le cas de BAP R1, BAP R2 et BAP réf.

On peut prétendre alors que quand la différence dans les volumes dans le canal vertical ne varie pas de plus de 0,38%, le béton peut être considéré comme acceptable.

Tous les bétons situés dans le rectangle (voir figure 97) délimité par une stabilité au tamis de 15% et un indice de ressuage IR de 0,38 sont des BAP de bonne qualité.

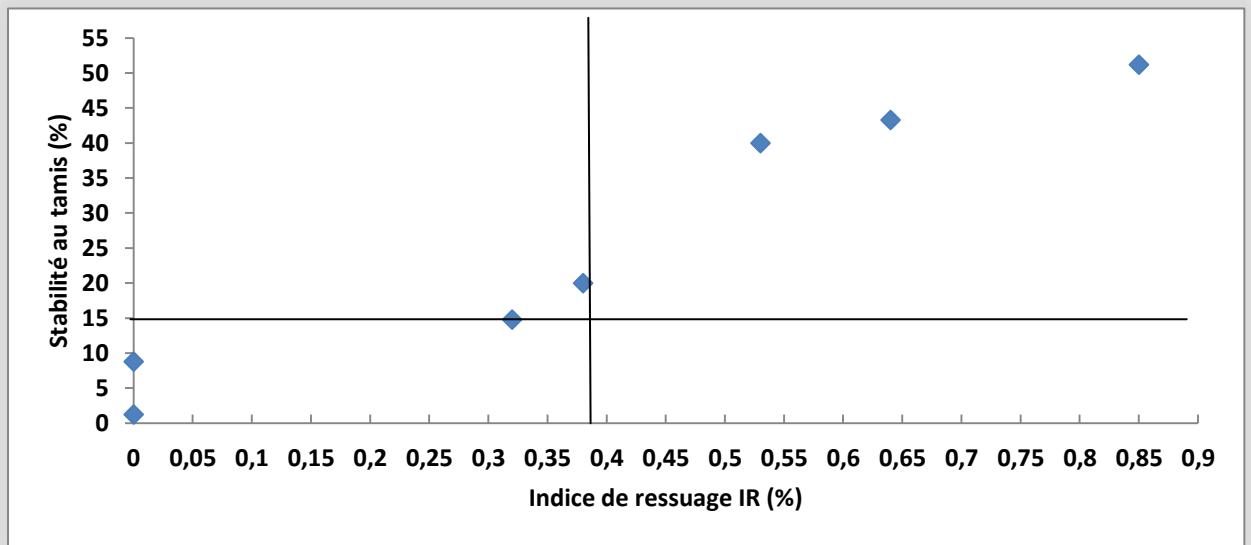


Fig. 97. Relation entre la stabilité au tamis et l'indice de ressuage.

Sur la figure 98, on peut voir que l'essai V-Funnel ne permet pas de juger de la tendance au ressuage des BAP. On peut voir sur la figure que pour un temps inférieur à 14 secondes l'IR peut varier de 0 à 0,85%. Par contre, il est toujours utile de noter que quand le temps est supérieur à 14 secondes, le risque de ressuage est minime car le béton devient visqueux.

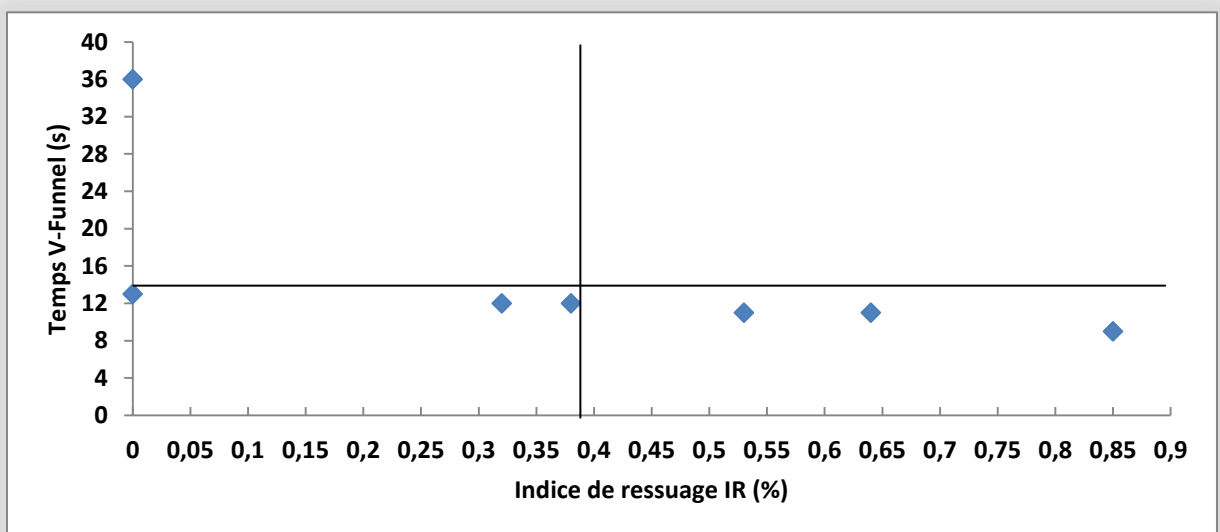


Fig. 98. Relation entre le temps d'écoulement à l'entonnoir en V et l'indice de ressuage.

En analysant les résultats représentés sur la figure 99, on peut noter que le risque de ressuage commence à devenir important quand l'étalement dépasse les 75 cm.

Ainsi on peut admettre qu'il n'est pas nécessaire de procéder à des essais de détermination de l'indice de ressuage si les bétons confectionnés présentent des étalements inférieurs ou égaux à 74 cm.

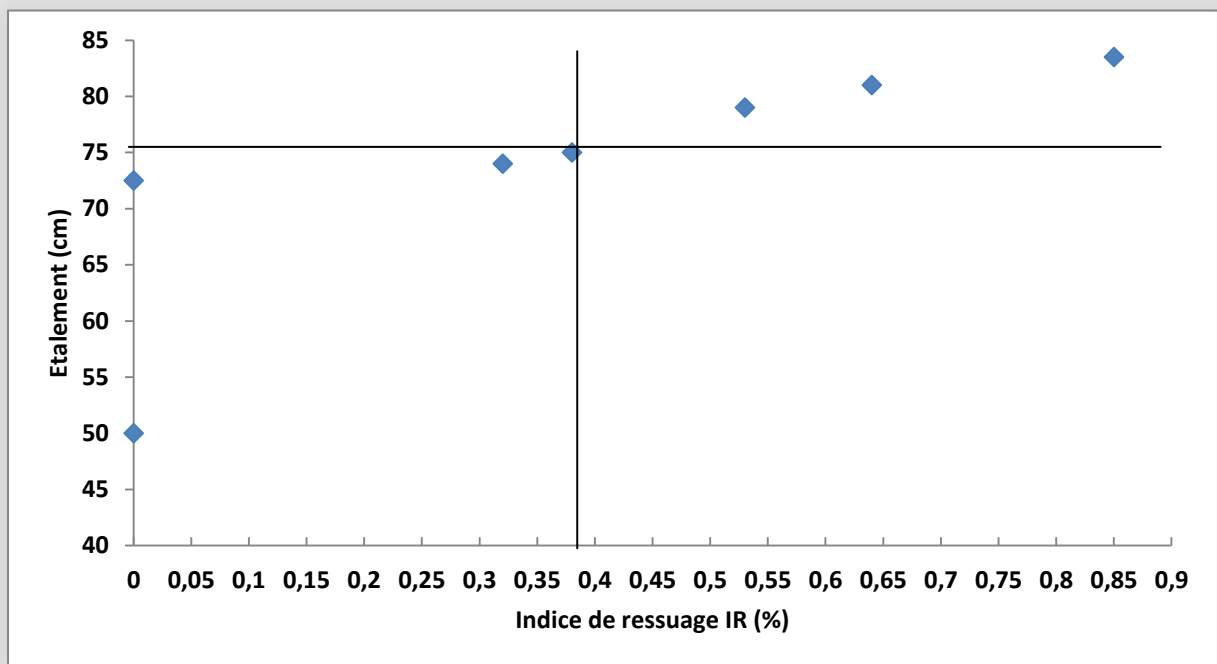


Fig. 99. Relation entre l'étalement et l'indice de ressuage.

La teneur en air est un autre paramètre qui influence le ressuage du béton. Plus un mélange contient un volume d'air important, moins il est visqueux car le volume de pâte disponible pour fluidifier un mélange est aussi fonction de la teneur en air [117]. Par conséquent le BAP qui contient une valeur de l'air occlus supérieure à 0,9 % d'air est très peu visqueux comparativement aux autres mélanges et représente un indice de ressuage IR trop petit.

En analysant les résultats représentés sur la figure 100, on peut noter que le risque de ressuage augmente lorsque la teneur en air diminue.

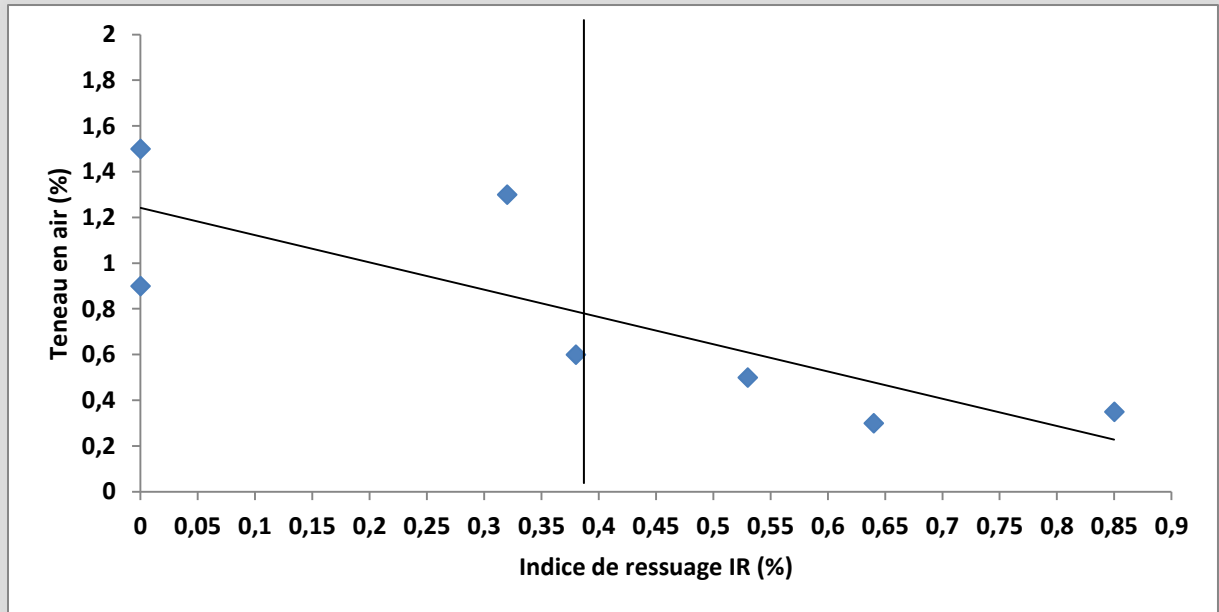


Fig. 100. Relation entre l'air occlus et l'indice de ressuage.

En ce qui concerne la résistance à jeune âge, 1 jour, on remarque que quand l'indice IR diminue la résistance à la compression augmente (fig. 101) sauf pour le BAP R1 qui représente un autre genre de l'instabilité c'est la ségrégation statique, voir la figure 96.

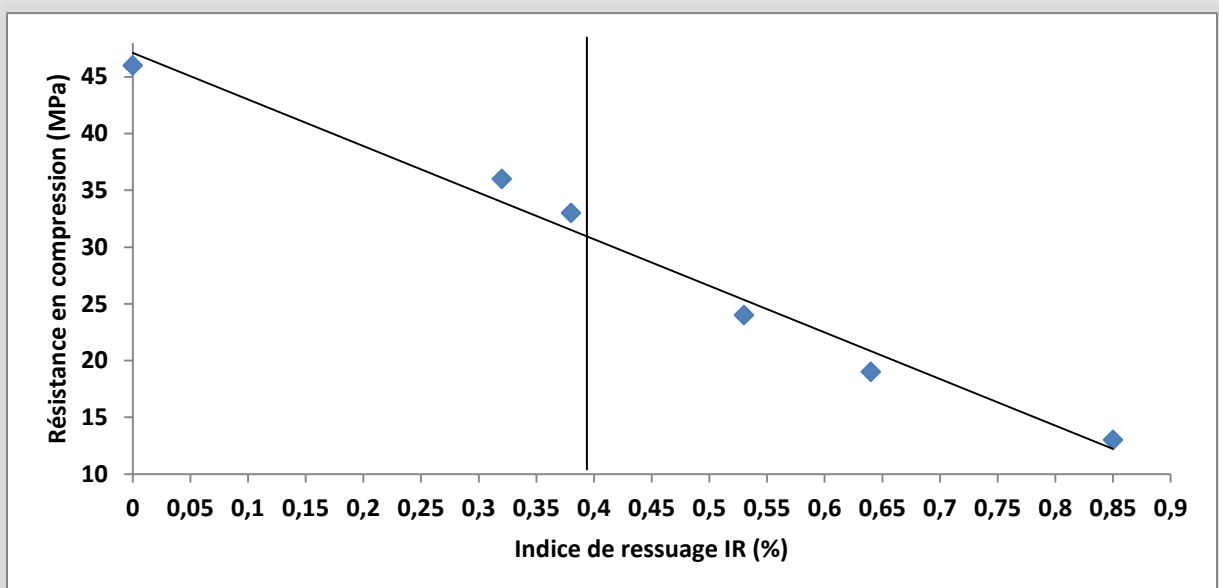


Fig. 101. Relation entre la résistance à la compression et l'indice de ressuage.

Sous la lumière des résultats des essais que nous avons réalisés selon notre procédure sur un ensemble de 7 compositions différentes on peut conclure que l'essai proposé est un essai très simple qui permet l'appréciation directe du ressuage dans les bétons. Il ressort des résultats obtenus que la limite de l'IR pour obtenir un béton stable est de l'ordre de 0,38%. Toutefois, il va falloir procéder à d'autres essais complémentaires en adoptant d'autres paramètres pour pouvoir conclure sur la limite de l'IR. En plus, au niveau résistance, la distribution non uniforme des granulats dans la masse se traduit directement par une résistance différentielle (par exemple le BAP R1).

Vu la fluidité importante des BAP, le risque de ségrégation statique n'est pas des moindres. Ainsi, il est très important de vérifier la stabilité du système de granulats dans la masse du béton. Plusieurs auteurs ont publié des essais plus ou moins simples pour la caractérisation de la ségréabilité des bétons. On peut citer les travaux de V.K. BUI et al [200], qui ont proposé un essai de mesure d'une profondeur de pénétration d'une sonde dans une masse de béton.

D'une manière générale, le béton est un matériau multiphasique. Les densités des nombreux composants de béton varient entre 1000 kg/m^3 (eau) et 3200 kg/m^3 (ciment). Avec un tel mélange, la gravité devient rapidement l'ennemi de l'homogénéité. Les hétérogénéités induites par la gravité sont divisés en deux catégories: ressuage et ségrégation. Les deux sont induites par la différence de densité entre les composants, mais le phénomène de ressuage, comme expliqué précédemment, est concerné par la migration de l'eau tandis que la ségrégation est souvent associée à la sédimentation statique. Les particules se déposent dans un échantillon donné ou dans le coffrage car leur densité est plus élevée que la densité du fluide de suspension.

En outre, la prise et le durcissement du béton sont les phases les plus critiques pendant les travaux de construction. Dans les premières heures, après la mise en œuvre, la microstructure du béton frais reste très fragile. Contrairement aux méthodes de test conventionnelles, les ondes ultrasonores ne peuvent pas perturber la microstructure. Par la suite, on va utiliser un autre outil qui permet de caractériser d'une manière claire l'homogénéité de béton dans le canal vertical en plexiglas. C'est l'auscultation sonique de béton frais.

VII. Auscultation sonore du béton frais

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en mouvement (mise en place, compactage) ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos. Les causes principales des divers types de ségrégation sont les suivantes :

- formulation inadéquate du béton (mauvaise recombinaison des fractions granulaires, dosage en ciment insuffisant, dosage en eau excessif, dosage excessif du superplastifiant) ;
- consistance trop fluide du béton frais ;
- temps de malaxage trop court ;
- mise en place incorrecte du béton.

En outre, l'étude de la propagation d'ondes dans le béton est complexe car elle met en jeu divers phénomènes couplés : porosité, hétérogénéités de différentes natures (ciment, sable, granulats, fibres) et dont les dimensions vont du nanomètre au centimètre.

L'étude expérimentale proposée (fig. 102) s'intéresse aux relations entre la vitesse des ultrasons, mesurée par des capteurs de 50 mm de diamètre et de 54 kHz de fréquence, et la homogénéité (ou stabilité) de béton frais. Les mesures de variation de vitesse de propagation des ondes sont réalisées toutes les demi-heures sur des poteaux verticaux en plexiglas dont les dimensions (en mm) sont 160 x 160 x 700. Les mesures de vitesses ultrasonores ont été déterminées : (1) de chaque côté du matériau, l'épaisseur doit alors être connue, et il faut avoir accès aux deux faces du matériau (mode de transmission direct, fig. 103a et mode de transmission semi direct, fig. 103b); et (2) par mesure sur une seule face du matériau (mode de transmission indirect, fig. 103c).

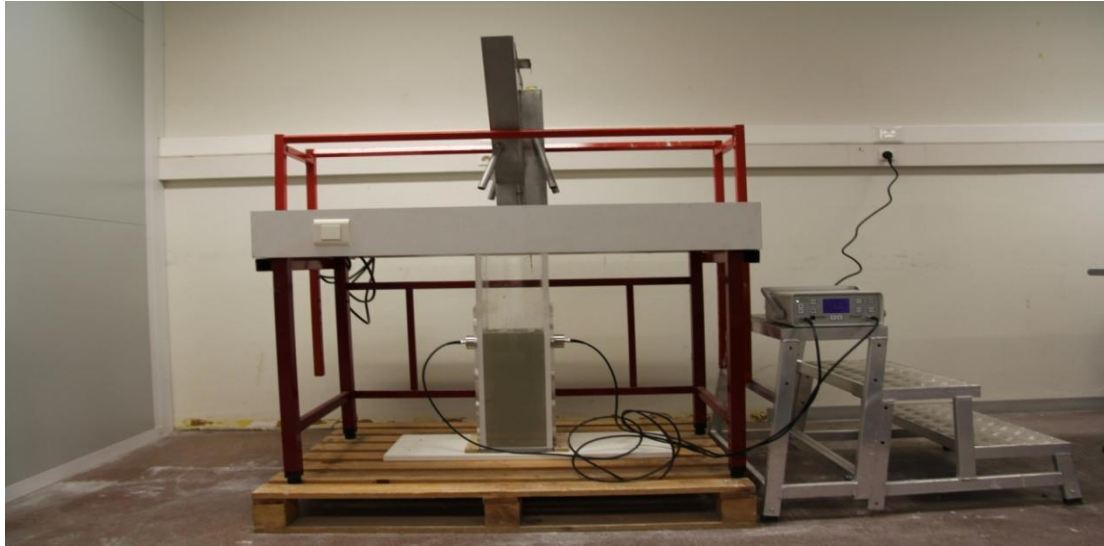
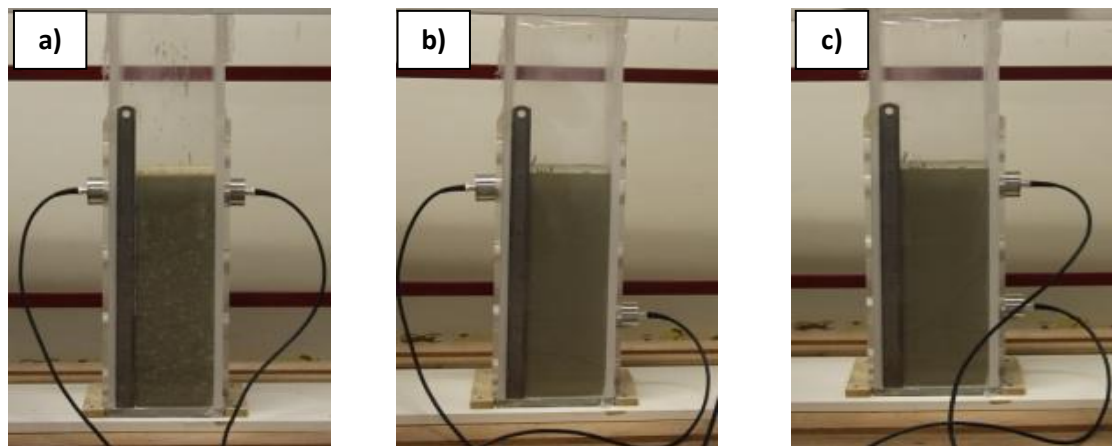


Fig.102. Auscultation sonore des bétons frais : Outil expérimental



a) Mode direct

b) Mode semi-direct

c) Mode indirect

Fig.103. Mesure des vitesses des ondes ultrasonores

Le caractère fortement hétérogène et aléatoire du béton pose également le problème de la répétitivité des mesures en différents endroits du béton. Une configuration particulière de disposition / nature / forme des hétérogénéités rencontrées au cours de la propagation donnera des paramètres de propagation spécifiques et non représentatifs du matériau. Pour prendre en considération l'hétérogénéité totale du matériau testé, les mesures de la vitesse sonore sont effectuées sur 4 points comme le montre la figure suivante (fig. 104).

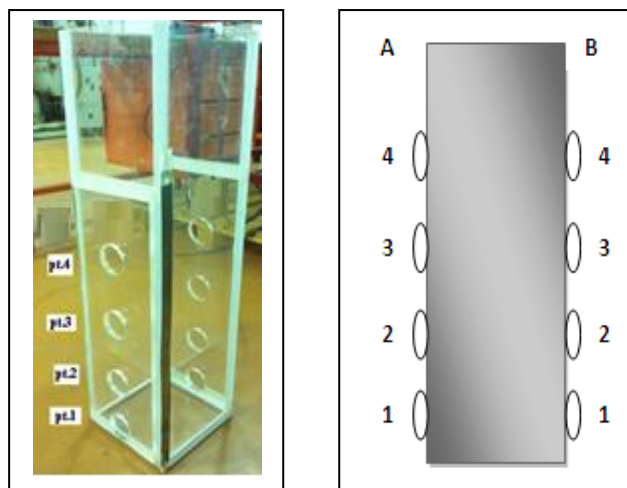


Fig. 104. Canal vertical en plexiglas utilisé pour l'auscultation sonique à l'état frais

Les résultats de la vitesse d'impulsions ultrasoniques peuvent être utilisés pour :

- (a) vérifier l'homogénéité du béton,
- (b) contrôler la qualité des produits en béton,

Un exemple d'application de cette méthode est présenté dans le tableau 25 et les figures 105 et 106:

Tableau 25. Auscultation sonique : La procédure de mesure (m/s)

30 min après le coulage

Réf.								transmission semi direct
	transmission direct Côté A-B				transmission indirect Côté B			
	①-①	②-②	③-③	④-④	①-④	①-③	①-②	②-④
BAP R1	1132	877	1008	871	2070	2309	3472	1424
BAP réf.	877	876	870	873	2033	2320	3225	1163
BAP R6	1114	769	1047	1449	1694	1503	2469	1081

60 min après le coulage

Réf.								transmission semi direct
	transmission direct Côté A-B				transmission indirect Côté B			
	①-①	②-②	③-③	④-④	①-④	①-③	①-②	
BAP R1	1164	882	871	872	2083	2162	3125	1413
BAP réf.	874	873	868	869	1577	2217	3086	1164
BAP R6	1056	1134	1093	1458	1800	1801	2967	1626

90 min après le coulage

Réf.								transmission semi direct
	transmission direct Côté A-B				transmission indirect Côté B			
	①-①	②-②	③-③	④-④	①-④	①-③	①-②	
BAP R1	995	860	876	890	1602	1484	2688	1057
BAP 7 réf.	873	872	872	867	1588	2190	3058	1387
BAP R6	1199	1515	1471	1596	2233	2567	3436	1749

120 min après le coulage

Réf.								transmission semi direct
	transmission direct Côté A-B				transmission indirect Côté B			
	①-①	②-②	③-③	④-④	①-④	①-③	①-②	
BAP R1	998	870	890	902	1590	1460	2644	1098
BAP réf.	870	865	872	866	1587	2180	3044	1233
BAP R6	1102	1500	1445	1580	2238	2430	3120	1805

150 min après le coulage

Réf.	transmission direct							transmission semi direct
	Côté A-B				Côté B			
	①-①	②-②	③-③	④-④	①-④	①-③	①-②	
BAP R1	1010	875	842	865	1582	1401	2624	1113
BAP réf.	873	870	872	864	1587	2178	3039	1160
BAP R6	1004	1478	1431	1536	2248	2249	2949	1905

180 min après le coulage

Réf.	transmission direct							transmission semi direct
	Côté A-B				Côté B			
	①-①	②-②	③-③	④-④	①-④	①-③	①-②	
BAP R1	1211	1248	1137	1221	1643	2244	2457	1281
BAP réf.	852	857	851	853	1605	2272	3246	1171
BAP R6	1151	1289	1677	1553	2242	2162	2487	1744

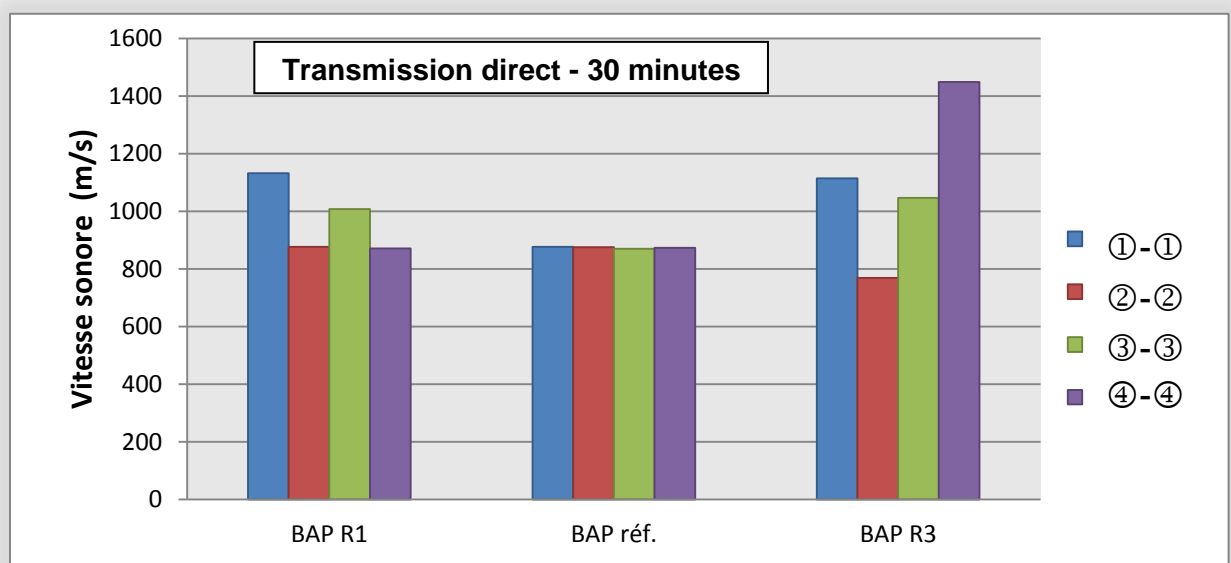


Fig. 105. Auscultation sonore au très jeune âge

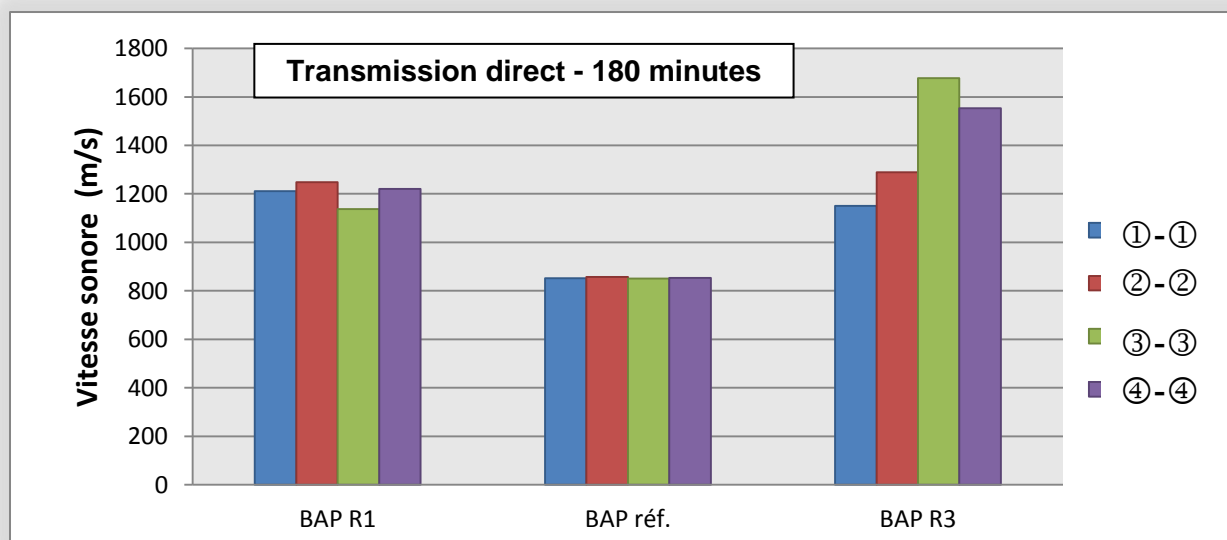


Fig. 106. Auscultation sonore au jeune âge

En analysant les résultats représentés sur le tableau 25, il est possible de faire des comparaisons qualitatives de béton (l'étude de l'homogénéité et de la qualité du béton) en se basant sur l'auscultation sonore à l'état frais. Les résultats obtenus, lors de notre travail, permettent de vérifier, pour le même béton, l'évolution de la vitesse sonore en fonction du temps (fig. 105 et 106). On peut noter aussi que le risque de l'instabilité de béton, avec le même temps d'analyse, se manifeste par l'évolution de sa vitesse sonore, par exemple le BAP réf. est très stable par rapport aux autres bétons parce que sa vitesse sonore, mode de transmission direct, reste constante quel que soient le point de mesure et le temps d'auscultation.

En outre, pour le BAP réf. et dans le cas du mode de transmission indirect, on remarque que la vitesse sonore augmente quand la distance entre les sondes (Émetteur-Récepteur) diminue. Pour les autres bétons, cette remarque n'est pas tout à fait correcte.

En ce qui concerne le mode de transmission semi direct, on remarque que les valeurs obtenues ne donnent pas une idée claire sur l'homogénéité de matériau.

En résumé, la ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en place ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos. Dans ces cas l'essai

proposé, avec le mode de transmission direct, peut être utilisé pour vérifier l'homogénéité du béton et contrôler sa qualité.

D'autre part, pendant la mise en œuvre du béton dans le coffrage, il faut respecter les hauteurs de chute et longueurs de cheminement retenues pour éviter la ségrégation et le ressuage de béton. Dans le cas contraire, il faut avoir vérifié, lors d'essais préalables, l'absence de ségrégation dommageable sur le type d'élément bétonné.

AXE 3

EXPLOITATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

I.	Analyse des bétons autoplaçants.....	162
I.1	Méthodes expérimentales.....	163
II.	Analyse des bétons autoplaçants fibrés BAPF.....	170
II.1	Composition et caractérisation des BAPF.....	171
III.	Analyse des bétons à haute performance BHP.....	188
III.1	Caractérisation rhéologique des BHP.....	189
III.2	Caractéristiques mécaniques des BHP à l'état durci.....	193
IV.	Bétons fibrés à hautes performances.....	194
IV.1	Caractérisation rhéologique des BHPF.....	195
IV.2	Performances mécaniques des BHPF.....	198
V.	Maturométrie.....	202
V.1	Influence de la température.....	205
V.2	Détermination de l'énergie d'activation E_a	208
V.3	Exemple de calcul de l'âge équivalent sur la base d'un suivi thermique.....	212

I. Analyse des bétons autoplaçants

Les dernières décennies ont connu une évolution remarquable des performances des bétons, tant sur le plan de leur comportement rhéologique que vis-à-vis de leur comportement mécanique. Ces progrès techniques sont le résultat du couplage entre des principes de formulations qui doivent satisfaire des cahiers des charges dont les impératifs vont souvent au-delà des traditionnelles obligations de résultat en termes de fluidité à la mise en œuvre et de résistance du béton durci.

La composition du mélange tel que le rapport Eau/Ciment, le ciment, les additions minérales et le superplastifiant affectent le comportement rhéologique du béton. En isolant chacun de ces facteurs, il est possible de distinguer des tendances générales à savoir quel sera leur effet sur le seuil de cisaillement et/ou sur la viscosité plastique du BAP. L'objectif de cette partie est de standardiser la formulation de béton autoplaçant avec des quantités élevées des additifs minéraux tout en assurant une bonne compréhension de ses propriétés rhéologiques et mécaniques;

En tenant compte des suggestions rapportées dans la littérature concernant la proportion de mélange de béton autoplaçant. Les dosages retenus du béton autoplaçant à la suite des essais préliminaires que nous avons expérimenté dans notre laboratoire « Polytech' Marseille » sont montrés dans le tableau suivant :

Tableau 26: Caractéristiques des différentes compositions de BAP

BAP	Superplastifiant			Ciment (Kg/m³)	Eau (l/m³)	Sable (Kg/m³)	Gravier (Kg/m³)	Filler calcaire (Kg/m³)	E/L
	Nat	SP%/L	SP						
BAP 0	T16	0,35	6,85	470	171,6	840	900	-	0,36
BAP 1	K20	0,5	5,73	470	150,9	900	900	-	0,31
BAP 2	T16	0,3	5,88	305,5	159,2	870	900	164,5	0,33
BAP 3	T16	0,3	5,88	258,5	159,6	870	900	211,5	0,33
BAP 4	K20	0,3	3,44	258,5	161	870	900	211,5	0,34
BAP 5	T16	0,15	2,5	283,87	181,7	900	900	116,13	0,45
BAP 6	T16	0,3	5	283,87	181,5	900	900	116,13	0,45
BAP 7	T16	0,45	9,75	350	147	890	900	170	0,37

En conclusion, huit différentes compositions (tableau 26) sont mises en place afin de montrer l'efficacité de la formulation adoptée et sont obtenues en variant le type de superplastifiant, la quantité des fines et le rapport E/C.

I.1 Méthodes expérimentales

I.1.1 Caractérisation rhéologique des BAP

Dans un premier temps, les propriétés du béton frais autre que d'affaissement ont été évaluées selon les recommandations de l'AFGC 2008 [12], puisque dans ce cas, la valeur d'affaissement n'est pas pertinente en raison du béton très fluide. Par conséquent, l'attention s'est focalisée sur la mesure de l'étalement, qui est le diamètre moyen (\varnothing_{fin}) du béton affaissé. Puis, le temps d'écoulement pour obtenir le diamètre moyen de 500 mm (t_{500}) a été mesuré. Les valeurs de l'étalement pour les différents bétons obtenues immédiatement après le processus de malaxage sont présentées sur la fig. 107.

Afin d'évaluer la capacité de remplissage des éléments structuraux d'autres tests ont été effectués à l'aide de la Boite en L. La différence dans le niveau de béton entre le début et la fin de la boîte (H_f/H_i) a été mesurée. Il y a généralement un risque de blocage du mélange lorsque le rapport de blocage est inférieur à 0,8. Les rapports de blocage des BAP sont indiqués dans la figure 108. La ségrégation statique, caractérisée par l'essai de la stabilité au tamis, est indiquée dans la figure 110.

Le temps d'écoulement pour les BAP en passant par un entonnoir en forme de V a été mesuré. Les temps d'écoulement en V-Funnel sont indiqués dans la figure 109.

En général, les résultats des essais permettant de caractériser le comportement des bétons autoplaçants fabriqués lors de cette étude sont regroupés dans le tableau 27.

Tableau 27 : Caractéristiques rhéologiques des BAP à l'état frais

BAP	Étalement (mm)	Temps d'étalement $t_{500}(s)$	Boîte en L Hf/Hi (%)	Stabilité au tamis (%)	V-Funnel(s)
BAP 0	700	4	0,84	13,72	9
BAP 1	750	3	0,84	14	14
BAP 2	690	3,5	0,81	5,625	12
BAP 3	700	2,5	0,89	12,29	11
BAP 4	740	2	0,80	1,66	15
BAP 5	550	5	0,60	2,32	40
BAP 6	725	3	0,86	18,82	20
BAP 7	725	4	0,92	8,8	13

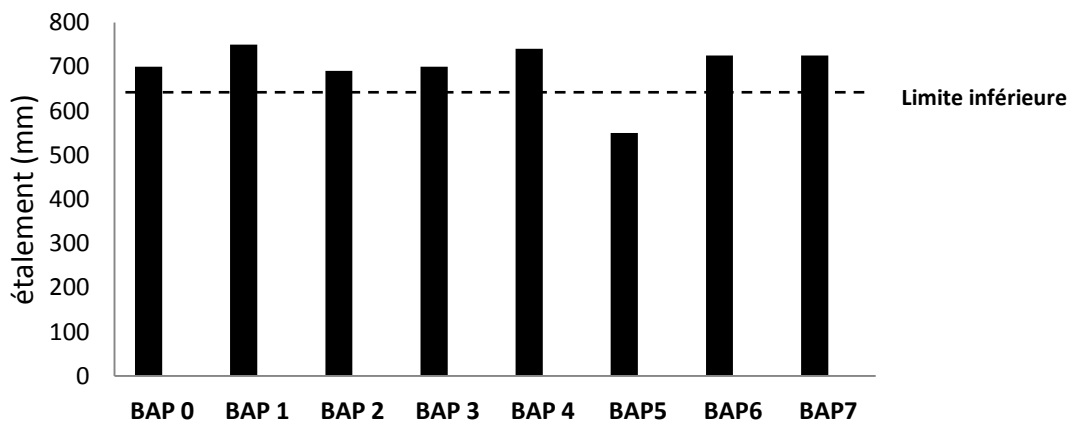


Fig. 107. Étalement des BAP.

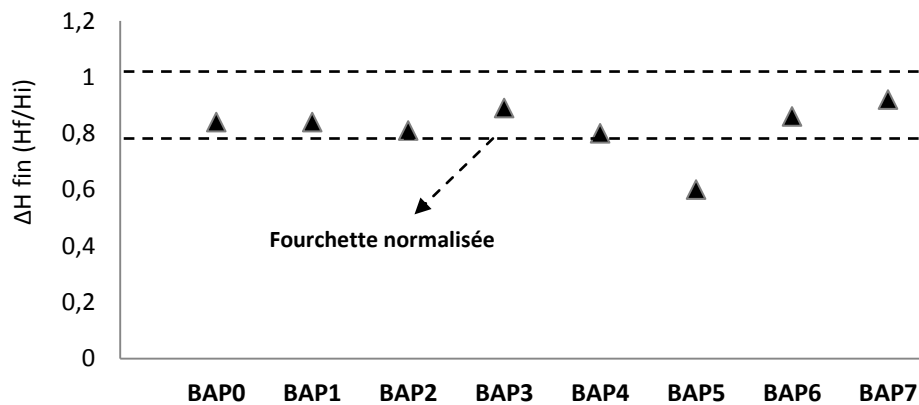


Fig. 108. Résultats d'essai Boîte en L (Hf/Hi) des BAP.

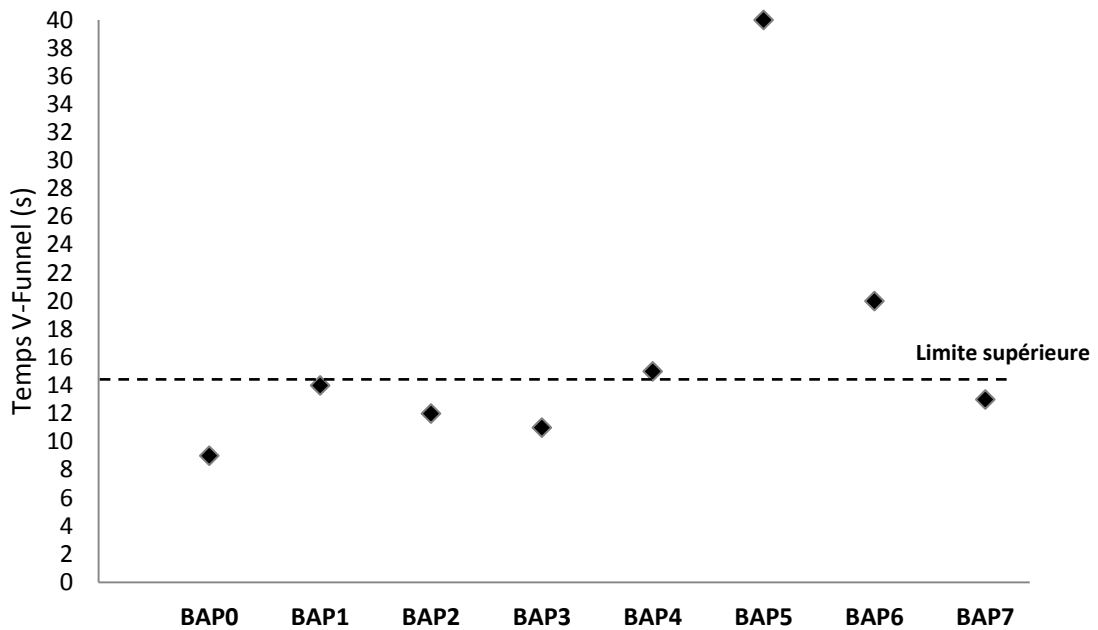


Fig. 109. Temps d'écoulement en V-Funnel des BAP.

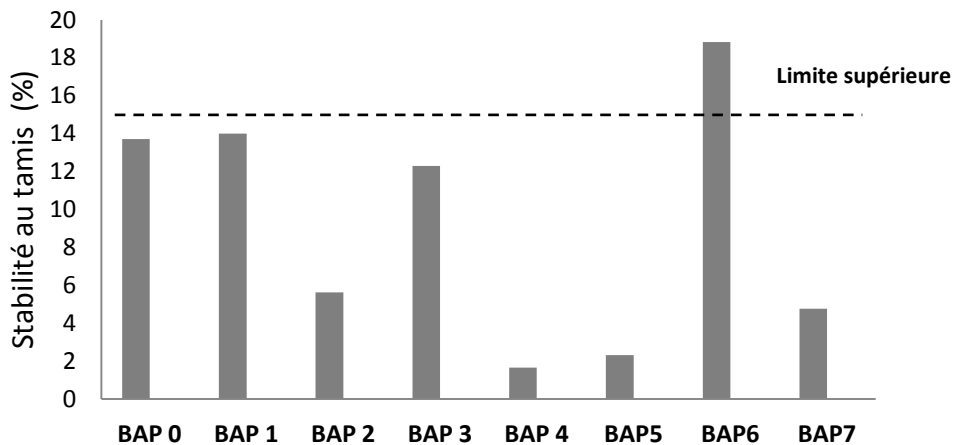


Fig. 110. Stabilité au tamis des BAP.

Selon les normes NF EN 12350 et les recommandations d'AFGC, avec un étalement supérieur à 600 mm, un gradient de remplissage (H_f/H_i) supérieur à 0,80, un taux de ségrégation inférieur à 15%, un temps d'étalement t_{500} inférieur à 5 s et un temps d'écoulement en V-Funnel inférieur à 14 s, les caractéristiques rhéologiques ci-dessus (fig. 107-110 et tableau 27) montrent que les BAP 0, BAP 1, BAP 2, BAP 3 et BAP 7 satisfont aux conditions requises pour être qualifiées de béton autoplaçant.

La caractérisation de la capacité à s'écouler des bétons à l'état frais afin de prédire la mise en œuvre du matériau sur chantier ou en usine de préfabrication a fait l'objet de nombreuses études durant la dernière décennie. En effet, lorsque la contrainte de cisaillement devient égale ou inférieure à la valeur de seuil du matériau, le béton s'arrête de s'écouler dans le coffrage.

Par conséquent, pour prédire la capacité à s'écouler du matériau dans une géométrie connue telle que celle de dalles ou de poutres, il est nécessaire d'être capable de prédire ce phénomène en fonction de paramètres d'entrée comme le seuil d'écoulement et la viscosité plastique.

Les réponses des tests de caractérisation rhéologique, en utilisant V-Funnel & canal horizontal en plexiglas, réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau 28. Les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité sont présentées dans le tableau 29 et la figure 111.

Tableau 28. Caractérisation rhéologiques des BAP

BAP	Masse volumique Kg/m³	Temps V-Funnel Tv (s)	Temps canal horizontal TL (s)	Longueur d'écoulement L (cm)	Hf (cm)	Hi (cm)
BAP 0	2450	9	10	86,5	5,5	7,0
BAP 1	2462	14	16	86,5	5,0	7,5
BAP 2	2418	12	15	86,5	4	8,5
BAP 3	2393	11	12	86,5	5,0	7,5
BAP 4	2396	15	17	86,5	4,7	7
BAP 5	2385	40	50	79	0	10
BAP 6	2429	20	26	86,5	1,2	9
BAP 7	2440	13	15	86,5	5,5	8

Tableau 29. Valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité des BAP

BAP	Seuil de cisaillement τ_0 (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s) Equation (4)	Viscosité plastique (Pa.s) Equation (15)
BAP 0	14,99	57,85	58,16
BAP 1	25,06	94,29	93,51
BAP 2	43,97	84,09	86,10
BAP 3	24,36	71,71	76,62
BAP 4	21,59	97,52	96,69
BAP 5	85,33	314,08	445,48
BAP 6	65,20	150,44	149,91
BAP 7	25,95	76,99	76,88

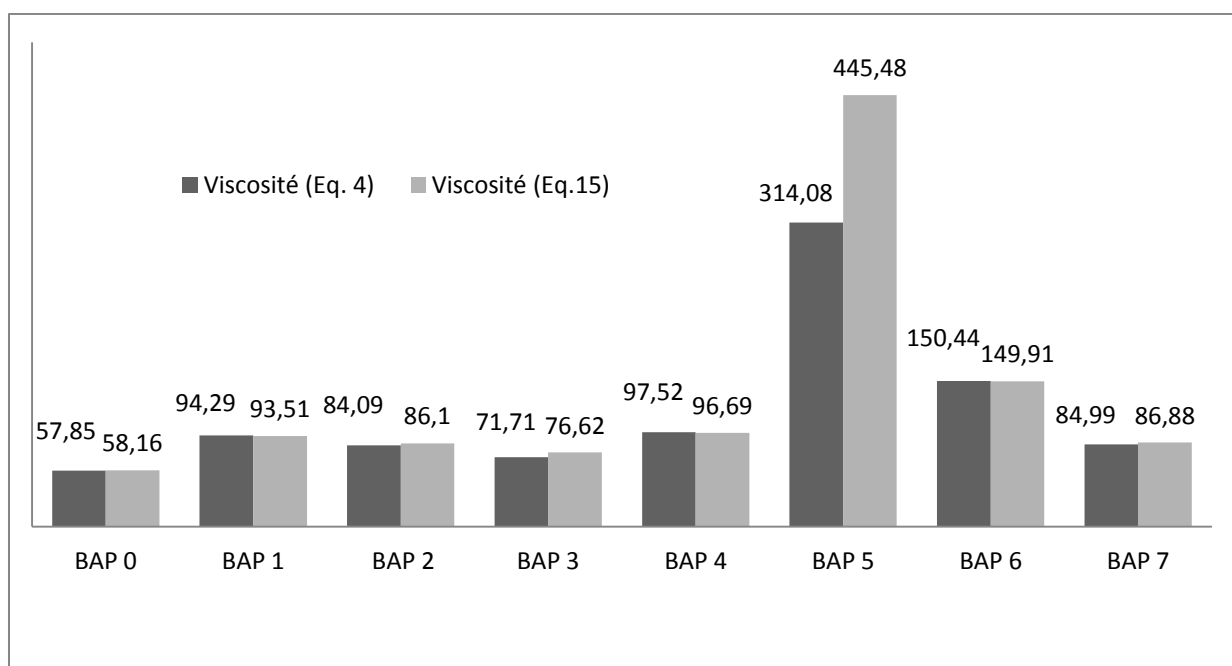


Fig. 111. Evolution de la viscosité plastique des BAP

La figure 111 montre que les valeurs de deux viscosités sont très proches. La différence entre les deux valeurs ne dépasse pas 9 Pa.s sauf pour le BAP 5 où la différence entre les deux viscosités dépasse 100 Pa.s (ce béton présente un temps d'écoulement en V-Funnel de l'ordre de 40 secondes).

D'une manière pratique, pour les bétons autoplaçants qui représentent un temps d'écoulement dans le V-Funnel de l'ordre de 25 secondes nous avons presque les mêmes valeurs de viscosité pour les deux méthodes de calcul.

En comparaison avec les bétons ordinaires les BAP doivent avoir un seuil d'écoulement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement et leur viscosité doit être modérée pour limiter le temps d'écoulement.

Nos résultats montrent que les BAP qui respectent les recommandations de l'AFGC et les normes NF EN 12350 possèdent des seuils de cisaillement inférieurs à 35 Pa et des viscosités inférieures à 85 Pa.s.

En conclusion, le béton qui possède une longueur d'écoulement dans le canal horizontal égale à $L_{\max}=86.5$ m, un seuil inférieur à 35 Pa et une viscosité inférieure à 85 Pa.s satisfait aux conditions requises pour être qualifiées de BAP.

I.1.2 Caractérisation mécanique des BAP

I.1.2.1 Mesure de la résistance à la compression

Trois échantillons cylindriques, 16x32 cm, ont été utilisés pour chaque mélange de béton pour des essais de compression, selon les normes européennes EN 12390-3 (tableau 30).

I.1.2.2 Mesure de la résistance à la traction

Trois échantillons cylindriques, 16x32 cm, ont été utilisés pour chaque mélange de béton pour des essais de traction par fendage appelé également « l'essai Brésilien », selon les normes européennes EN 12390-6 (tableau 30).

I.1.2.3 Mesure du module d'élasticité et coefficient de Poisson

Trois éprouvettes cylindriques 16x32 cm, pour chaque mélange de béton ont été fabriquées pour l'évaluation de module d'élasticité en compression et coefficient de Poisson selon les normes ASTM C469-02e1 (tableau 30).

Tableau 30: caractérisation mécanique des BAP

BAP	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson
	1 jour	7 jours	28 jours			
BAP 0	27,2	41,6	51,05	3,4	32,43	0,332
BAP 1	33,9	50,3	56,95	3,8	38,12	0,381
BAP 2	27,2	41,6	51	3,4	36,20	0,401
BAP 3	25	36,4	49,2	3,0	31,74	0,391
BAP 4	26	48	53	3,6	32,23	0,341
BAP 5	19	28,2	41	2,6	31,70	0,351
BAP 6	25,1	40,2	49,5	3,4	33,10	0,322
BAP 7	46	64	70	4,2	48,02	0,311

Les réponses des tests de la résistance à la compression réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans l'organigramme suivant (fig.112):

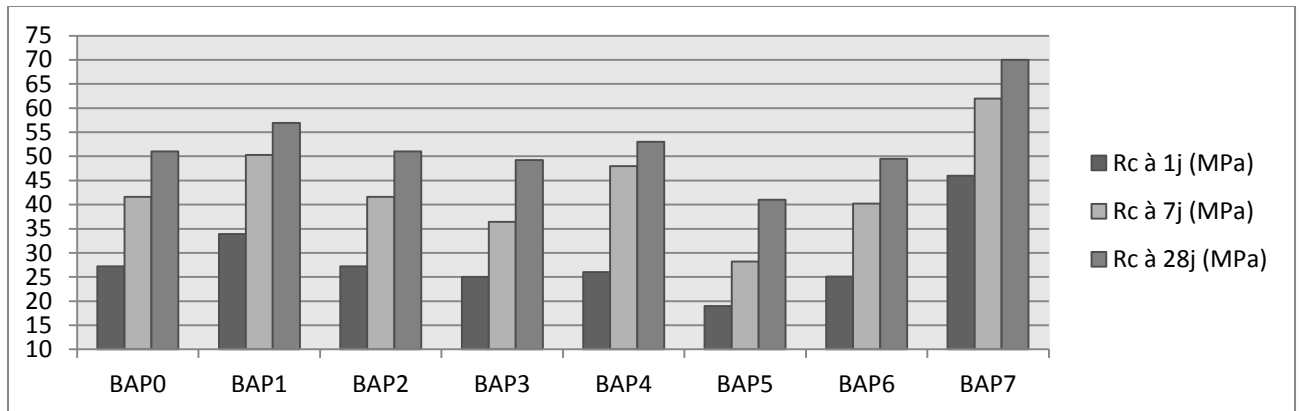


Figure 112. Évolution des résistances à la compression en fonction du type de bétons

D'après la figure 112, on remarque que le BAP7 est le plus satisfaisant au niveau des caractéristiques mécaniques. Le BAP7 présente une amélioration de la résistance à la compression sur éprouvettes 16 x 32 cm de 40%, 35% et 27% par rapport à celui de BAP 0 (par exemple) à 1, 7 et 28 jours respectivement. Le BAP 7 possède une résistance à la compression, à 1 jour, de l'ordre de 46MPa et de 70 MPa à 28 jours. Pour les autres paramètres le BAP 7 présente un coefficient de Poisson de l'ordre de 0.311 et un module d'élasticité d'environ 48 GPa.

De plus, on remarque que pour le BAP7 le rapport RC_{1j} / RC_{28j} est de l'ordre de 65% ce qui montre que plus de la moitié de la résistance à la compression de ces bétons autoplaçants est acquise pendant les premiers jours, de coup, ces bétons présentent des améliorations notables à jeune âge.

En outre, comme on le constate sur le tableau 27, le BAP7 satisfait aux conditions requises pour être qualifiées de béton autoplaçant, en plus, son seuil de cisaillement est de l'ordre de $25 \text{ Pa} < 35 \text{ MPa}$ et sa viscosité est d'environ 85 Pa.s . Pour cela on l'adopte, par la suite, comme bétons de référence pour les bétons autoplaçants fibrés.

II. Analyse des bétons autoplaçants fibrés BAPF

Le béton classique possède une très bonne résistance à la compression mais ne peut en aucun cas résister à de fortes contraintes de traction. C'est pour pallier ce défaut qu'a été mis au point le béton armé. C'est aussi le tout premier concept du béton renforcé de fibres, permettant d'obtenir en plus un renforcement homogène.

Pour bien appréhender le béton fibré. Il faut bien connaître ses spécificités par rapport à sa mise en œuvre. La plus importante particularité concerne l'orientation préférentielle des fibres qui dépend de deux paramètres, les techniques de mise en œuvre et le fait que le béton ait à s'écouler ou non dans les coffrages.

Si l'on souhaite que les fibres soient actives au niveau structurel, cela veut dire que le domaine d'application des bétons de fibres concerne les structures de dimensions modestes (poutrelles, coques minces...). Il est aussi très intéressant de penser au couplage du BAP et des fibres. Les BAP sont fragiles et nécessitent l'apport de renforts pour la durabilité. Les fibres de leur côté ont besoin d'une matrice très adhérente pour fonctionner au mieux. La logique de ces deux matériaux conduit naturellement à les marier.

Dans la partie suivante on va essayer d'améliorer les propriétés mécaniques du béton autoplaçant par l'ajout des fibres, sans modifier notablement ses performances rhéologiques. En partant de la formulation d'un béton autoplaçant qui respecte tous les critères rhéologiques et mécaniques fixés par les normes, nous avons cherché à

modifier la formulation en faisant varier le squelette granulaire par l'ajout des fibres métalliques ou polymériques.

II.1 Composition et caractérisation des BAPF

Avec la présence des fibres dans la matrice, le béton devient plus ductile et les fibres offrent la résistance contre la propagation des fissures. Cependant, l'effet des fibres dépend fortement du type de fibre utilisée, la taille et les propriétés de la fibre, la fraction de volume ajouté et les propriétés de la matrice.

La formulation du BAPF qu'on a choisi dérive de la meilleure formulation du béton autoplaçant trouvé dans la partie précédente : BAP7. Les tableaux 31 et 32 montrent la composition des BAPF réalisés dans notre laboratoire et les caractéristiques rhéologiques obtenues suite aux essais tels que Boite en L, étalement, V-Funnel et stabilité au tamis.

Les dosages retenus du béton autoplaçant fibré à la suite des essais préliminaires que nous avons expérimentés sont montrés dans le tableau 31. Après plusieurs essais rhéologiques, nous sommes alors arrêtés sur quatre formulations. Tous les bétons ont été préparés avec le même rapport E/L de 0,37 et le même dosage en superplastifiant TEMPO16 (0,45% /L).

Tableau 31: Composition des BAP avec des fibres métalliques et synthétiques

BAP- F	Compositions							E/L
	Fibres		Ciment (Kg /m ³)	Eau (l /m ³)	Sable (0/2) (Kg /m ³)	Gravier (5/10) (Kg /m ³)	Filler Calcaire (Kg /m ³)	
	Type	(Kg /m ³)						
BAP 7	-	-	350	147	890	900	170	0,37
BAP FM1	ESF 25	100	350	147	870	880	170	0,37
BAP FM2	RC 80/50	100	350	147	840	850	170	0,37
BAP FM3	RC 80/50	50	350	147	875	885	170	0,37
BAP FS4	Micro-synthétique	10	350	147	860	900	170	0,37
BAP FS5	Micro- synthétique	5	350	147	875	900	170	0,37
BAP FS6	Micro- synthétique	2,5	350	147	890	900	170	0,37
BAP FS7	Macro- synthétique	2,5	350	147	890	900	170	0,37

Le développement des BAPF augmente le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton lors de l'écoulement. Les réponses des tests de caractérisation rhéologique réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau 32.

Tableau 32 : Les résultats des essais sur BAPF à l'état frais

Caractérisations rhéologiques					
BAP-F	Étalement (mm)	Temps d'étalement (s)	Boîte en L (H2/H1)	Stabilité au tamis (%)	V-Funnel (s)
BAP 7	725	4	0,92	8,88	13
BAP FM1					
BAP FM1	725	7	0,80	12,5	34
BAP FM2	Béton ferme				
BAP FM3	720	6	0,70	11,4	120
BAP FS4					
BAP FS4	Béton ferme				
BAP FS5	620	7	0,72	15	50
BAP FS6	650	5	0,80	14,3	13
BAP FS7	650	5	0,80	13,5	14

Selon les normes NF EN 12350 et les recommandations de l'AFGC - étalement supérieur à 600 mm, gradient de remplissage H2/H1 supérieur à 0,80, taux de ségrégation inférieur à 15%, temps d'étalement T500 inférieur ou égal à 5s et temps d'écoulement à V-Funnel inférieur à 14 s - nos résultats expérimentaux montrent que les formulations BAP7, BAP FS6 et BAP FS7 satisfont aux conditions requises pour être qualifiées de béton autoplaçant.

En général, les fibres les plus utilisées sont les fibres droites et c'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration (exemple : BAP FM1). On trouve aussi des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [204] et par frottement à l'interface avec la matrice. L'avantage des fibres à crochets est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus

efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton (exemple : BAP FM2). Voir figure 113. Les fibres synthétiques sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent (exemple : BAP FS7).

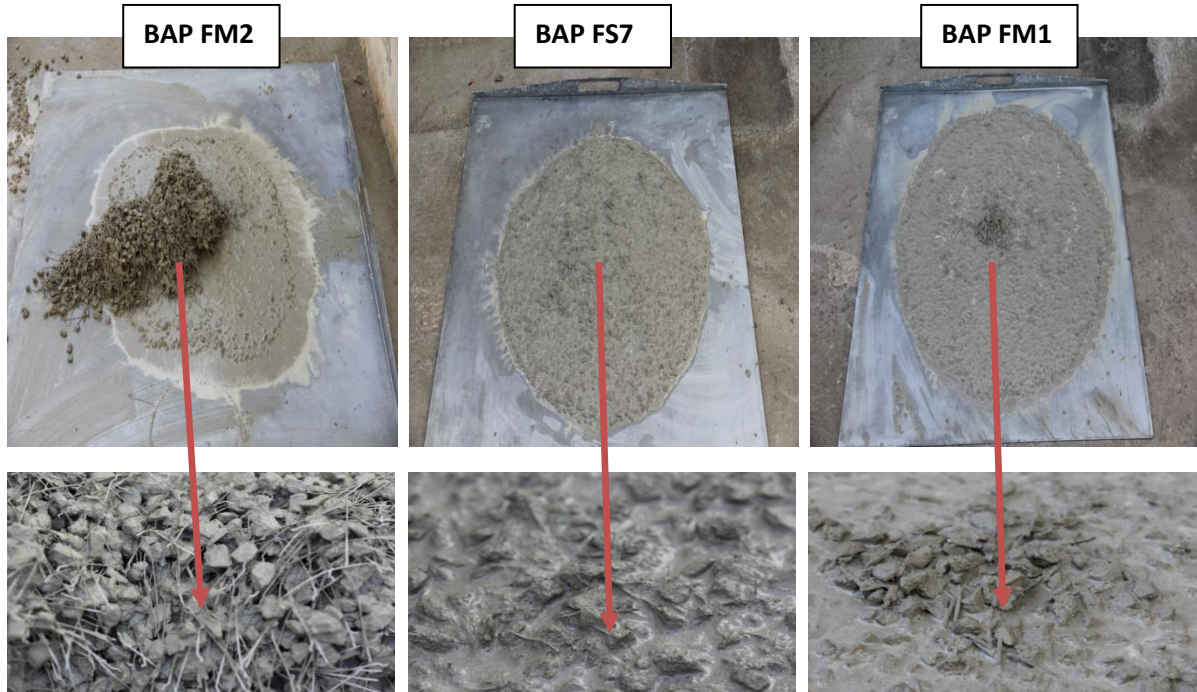


Fig. 113. Répartition des fibres durant l'essai d'étalement.

D'une manière générale, les fibres métalliques interviennent à l'échelle de la structure en apportant de la capacité portante et de la ductilité. Comme les armatures traditionnelles de béton armé, les fibres ont pour objectif de maîtriser la fissuration. On peut dire qu'il s'agit d'un béton armé à l'échelle locale. Tandis que les fibres synthétiques (par exemple en polypropylène) sont principalement utilisés pour "coudre" les microfissures et d'éviter leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macrofissures.

Les réponses des tests de caractérisation mécanique (résistance à la compression et en flexion, module d'élasticité et coefficient de Poisson), à jeune âge, réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 33: Caractéristiques mécaniques des BAP fibrés

Caractérisations mécaniques							
Formulation	Résistance à la compression (MPa)			Résistance flexion 7 jours (MPa)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Masse Volumique (Kg/m³)
	1 jour	7 jours	28 jours				
BAP 7	46	64	70	5,69	48,02	0,311	2440
BAP FM 1	52,7	69	78	8,68	58,14	0,381	2512
BAP FM 3	50,7	67	73	8,08	52,47	0,401	2434
BAP FS 5	44,2	55,5	61	6,28	49,21	0,391	2402
BAP FS 6	41,4	54,2	67	6,64	48,22	0,341	2367
BAP FS 7	45,5	61,7	69	10,46	52,35	0,351	2373

Le comportement en compression n'est que peu influencé par la présence des fibres. Les fissures créées ne permettent pas aux fibres d'être sollicitées suffisamment pour améliorer significativement le comportement du béton. Par contre les fibres à crochets développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice ce qui explique l'augmentation de 8 % de la résistance à la compression de BAP FM1 par rapport à BAP7 à 7 jours.

L'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse [205]. La figure 114 regroupe la distribution des fibres dans le béton à l'état durci.

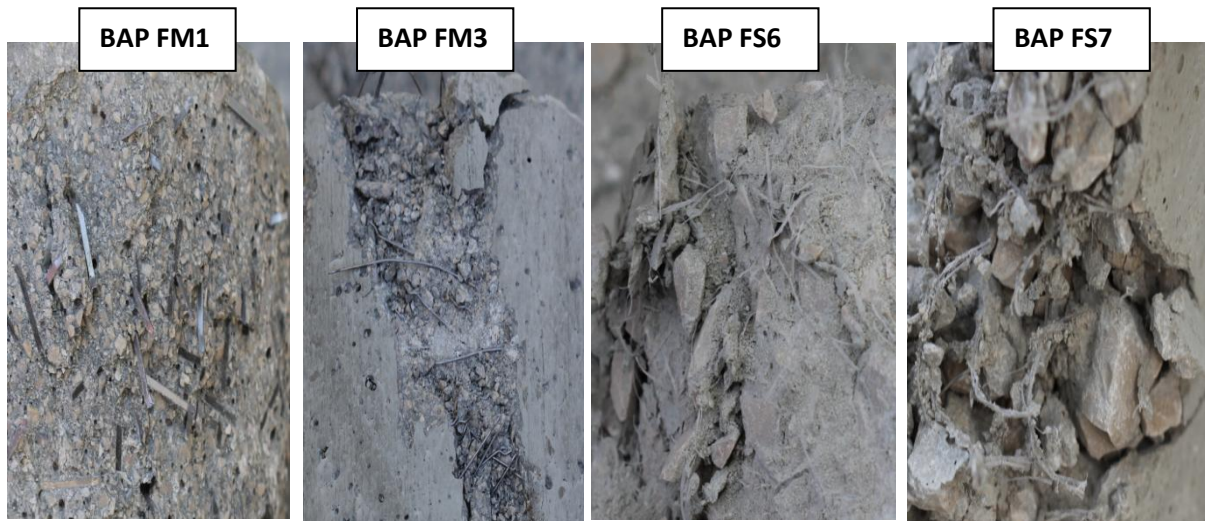


Fig. 114. Répartition des fibres dans l'éprouvette après l'essai de compression.

Le béton autoplaçant présente généralement un grand nombre de microfissures, surtout à l'interface entre les agrégats grossiers et le mortier, même avant soumission à n'importe quelle charge. Ces microfissures influent sur le comportement mécanique du béton, et contribuent au comportement non linéaire à faibles niveaux de contrainte et provoquent ainsi une expansion volumique pendant le chargement. C'est la principale raison de la faible résistance à la traction du béton (BAP 7).

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renforts, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement et ponts de matière. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises. Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton. Les fibres, en cousant la fissure, assurent une continuité structurale et permettent au béton d'avoir un comportement ductile en lui conférant une capacité portante post-fissuration.

L'étude du comportement en traction par flexion permet de mieux mettre en évidence l'effet d'un renfort de fibres via le gradient de déformation. Tous les résultats obtenus sont regroupés dans la figure 115.

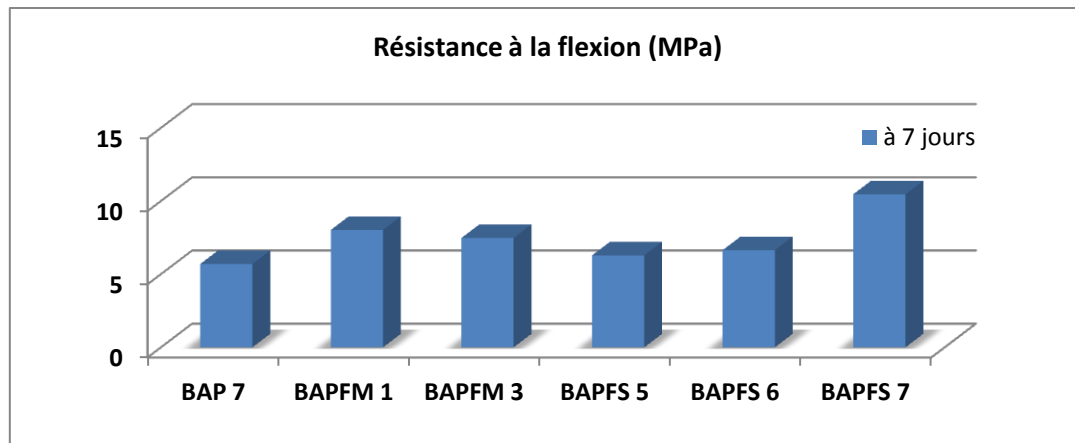


Figure 115. La résistance mécanique à la flexion des BAP fibrés

Nous constatons que la résistance maximale en flexion de béton de fibres BAP FS7 sur éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm est plus grande que celle du béton témoin BAP7. Cette augmentation est de l'ordre de 45%. Il est d'usage à relier cette valeur de résistance à l'utilisation des fibres macro-synthétiques.

Avec un choix approprié du type de fibres, de leur taille ainsi que de leur dosage, il est possible d'inhiber la propagation des premières microfissures. Les fibres, en assurant le transfert de contraintes à travers la fissure, limitent son ouverture et sa propagation. La localisation de la macro fissuration est ainsi retardée, limitant ainsi la fragilité du matériau.

La figure 115 montre la variation de la résistance à la flexion en fonction de la nature de fibres. Dans ce cas on constate que la résistance à la flexion n'est que peu influencée par la présence des fibres métalliques et micro-synthétiques et qu'elle augmente avec l'utilisation des fibres macro-synthétiques.

Par contre, plusieurs auteurs ont montré que la résistance à la flexion augmente d'une manière remarquable lorsqu'on utilise les fibres métalliques, mais pour atteindre cette amélioration il faut un dosage en fibres plus adapté. Par exemple, K.ABDU, H. HOUARI 2007 [206] ont montré qu'un dosage de 2% en fibres métalliques améliore la valeur de la résistance à la flexion de 31%, mais le fait d'augmenter le dosage en fibres métalliques perturbe les caractéristiques rhéologiques de béton.

Dans notre cas, avec un dosage en fibres métalliques qui respecte les caractéristiques rhéologiques d'un BAP, la résistance en flexion n'est que peu influencé.

Grâce à l'excellente capacité des fibres macro-synthétiques à se répartir dans la matrice cimentaire (nombre élevé de fibres par kg), ces fibres améliorent considérablement les performances des bétons renforcés de fibres, comparativement aux autres fibres (cf. figure 116 et 127).

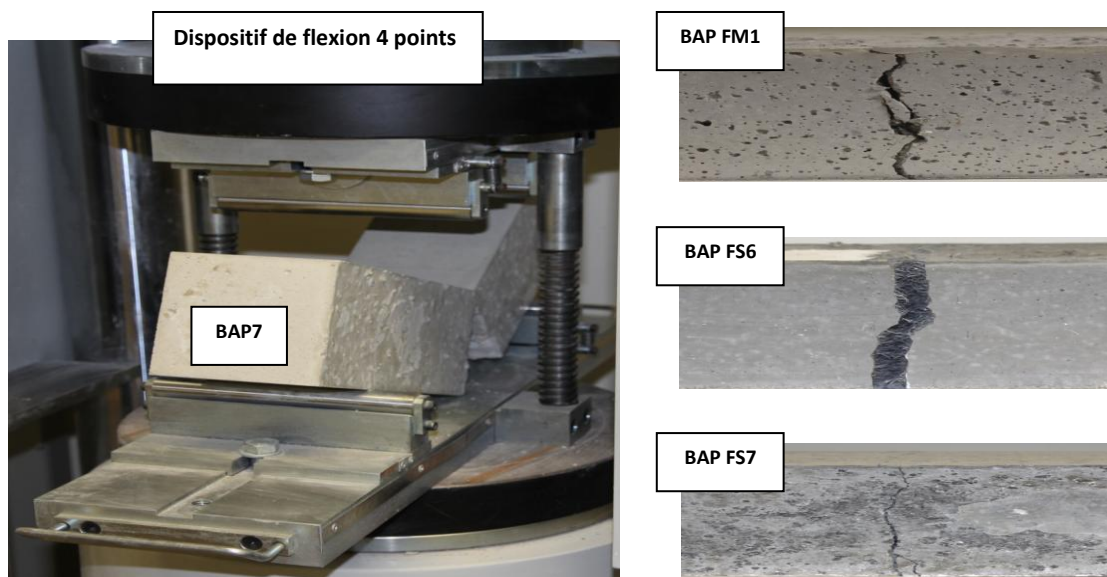
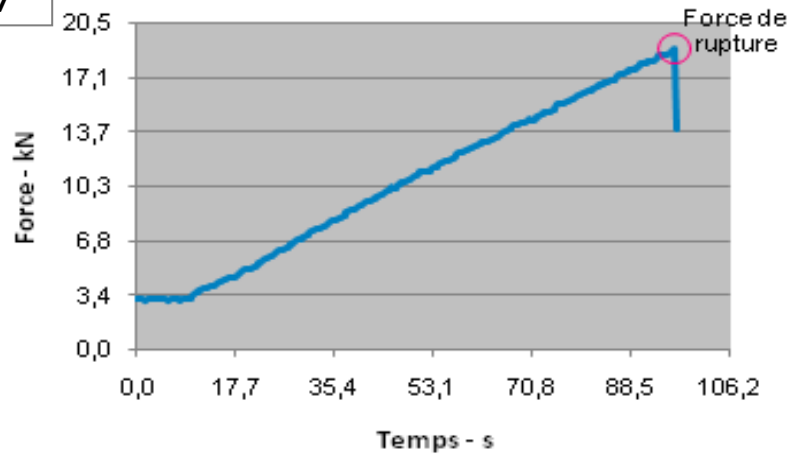
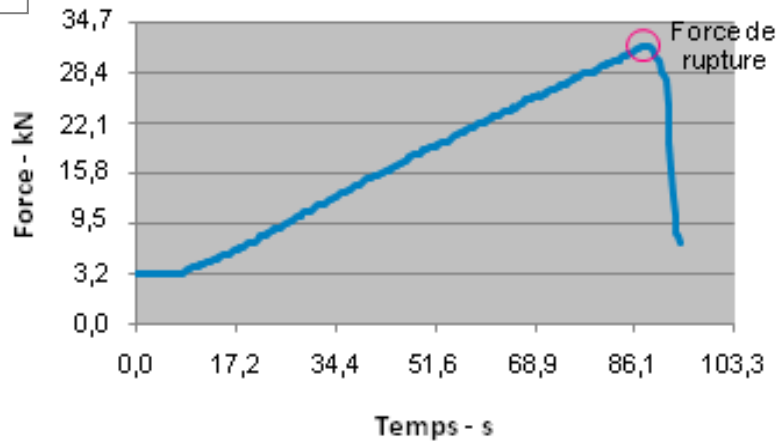
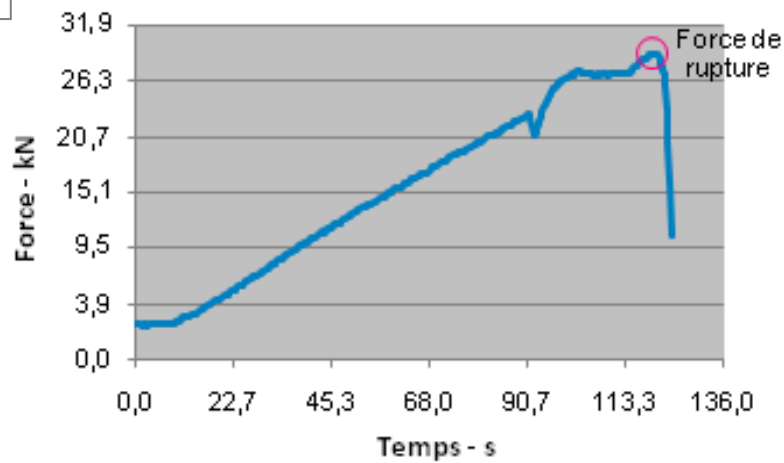


Fig. 116. Fissurations des bétons fibrés après l'essai de la flexion.

Les fibres macro-synthétiques facilitent la mise en place du produit fibré, par rapport à des fibres métalliques. Sa flexibilité rend le malaxage et l'écoulement du mélange fibré beaucoup plus faciles, sans risque d'endommagement ou de blocage de l'équipement et sa finesse procure un renforcement efficace, dense et homogène.

BAP 7**BAP FM1****BAP FM3**

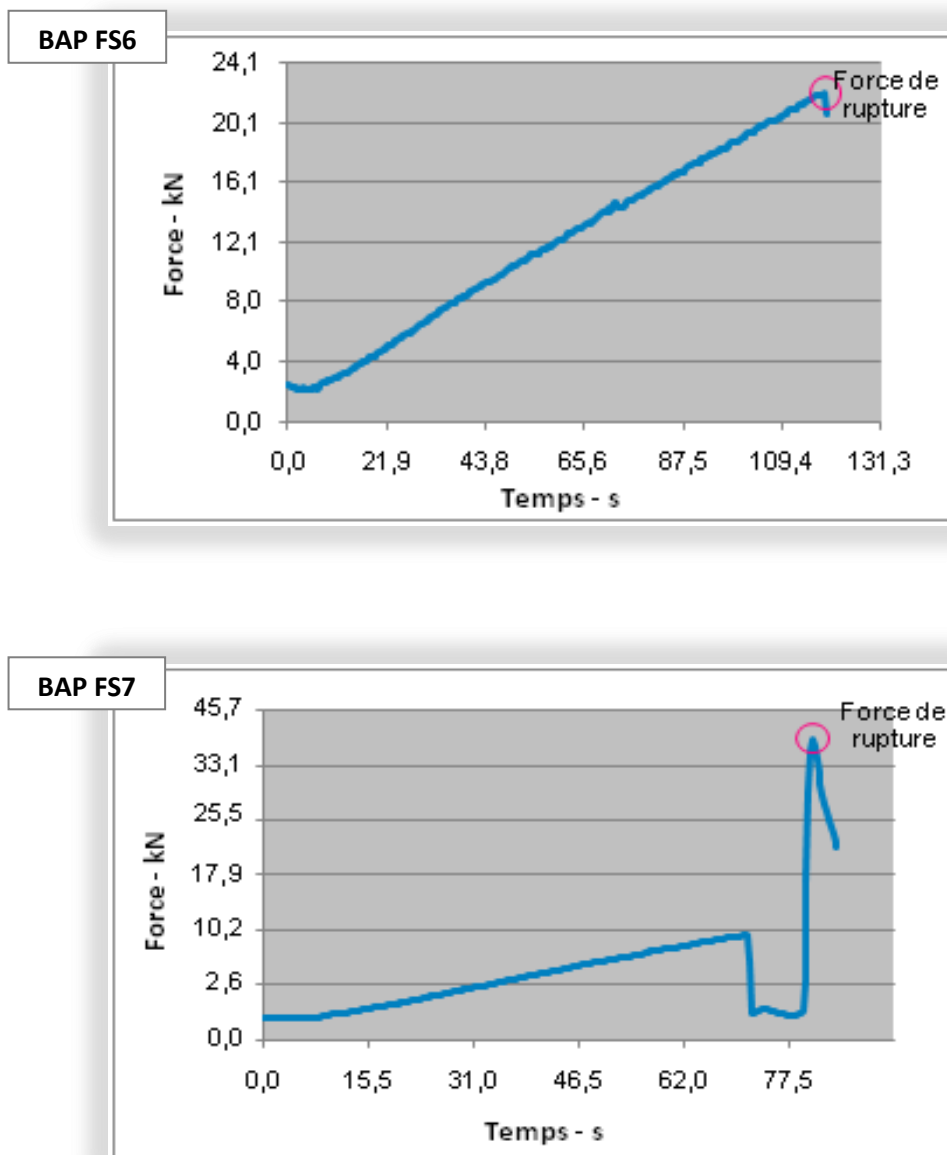


Fig. 117. Force de rupture en fonction du temps de sollicitation- flexion 4 points.

L'amélioration des propriétés mécaniques par l'utilisation de macro-fibres synthétiques est proportionnelle à leur taux d'addition et à leur efficacité. De plus, ces fibres apportent une augmentation de la ténacité du béton et, par le fait même, elles améliorent son comportement en post-fissuration.

En conclusion, cette partie permet de montrer qu'il est possible de fabriquer un béton autoplaçant fibré avec les matériaux locaux présentant les mêmes composants de base qu'un béton autoplaçant et permettant ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celles connues à l'échelle internationale.

Notre travail a donc consisté, en premier lieu, à mettre en évidence, à partir d'essais expérimentaux, l'influence de fibres métalliques et synthétiques sur la fluidité et la résistance du béton autoplçant. Puis, la visualisation de fissures développées a été effectuée dans le but de valider une formulation optimisée.

En outre, l'action mécanique des fibres est fortement liée à leur distribution. Alors qu'elles ont été introduites avec la volonté d'assurer au béton un renforcement homogène, on constate en fait que la mise en œuvre introduit une anisotropie qui ne peut être négligée.

Nos résultats montrent que (1) avec un dosage en fibres métalliques qui respecte les caractéristiques rhéologiques d'un BAP, la résistance en flexion n'est que peu influencé; (2) grâce à l'excellente capacité des fibres macro-synthétiques à se répartir dans la matrice cimentaire (nombre élevé de fibres par kg), la résistance en flexion est grandement améliorée; (3) l'utilisation d'une grande quantité des fibres micro-synthétiques augmente l'agglomération des fibres dans le béton frais ce qui perturbe les caractéristiques autoplçantes.

La caractéristique mécanique par le module d'Young est aussi importante car elle conditionne la rigidité des structures. En comparant un béton autoplçant à des bétons autoplçants fibrés, on note une augmentation du module avec la teneur en fibres. À titre d'exemple le BAP 7 possède un module d'élasticité de 48,02 GPa, alors que pour le BAP FM1 ce module est de l'ordre de 52 GPa.

En général, pour augmenter la résistance du béton, il faut diminuer la porosité de la matrice et donc diminuer le rapport E/C. Un rapport E/C inférieur à 0,4 correspond en général, avec les ciments courants, au domaine des BHP.

III. Analyse des bétons à haute performance BHP

La présente partie va nous montrer qu'il est possible de fabriquer un béton à haute performance avec les matériaux locaux présentant les mêmes composants de base qu'un béton autoplçant et permettant ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celles connues à l'échelle internationale.

Quatre formulations de béton ont été étudiées dans le cadre de ce travail. La première formulation correspond à un béton à haute résistance (BHP Millau) avec

des matériaux locaux, noté BHP1, la deuxième formulation est associée à un BHP modifié par rapport à celui de Millau, noté BHP2, dont la formulation est testée dans le but de développer une formulation de béton autoplaçant à partir du BHP Millau. La troisième formulation est celle d'un béton à haute performance dérivée de la meilleure formulation des BAP (BAP7), noté BHP3. La quatrième formulation consiste en un béton à haute performance avec une quantité de ciment très importante (500 Kg/m^3), noté BHP4.

Les bétons qui ont fait l'objet de la présente étude sont des bétons à base de matériaux locaux. Le ciment utilisé est du type CEM I 52,5 R et le superplastifiant est de type KRONO 20.

Ce qu'il fallait respecter en premier lieu est de travailler sur des bétons à haute performance qui répondent aux exigences de l'AFGC [12] et au guide Européen pour les BAP [11]. La composition des bétons conçus est rassemblée dans le tableau 38.

Tableau 38. Composition des BHP étudiés

BHP	Compositions								
	Superplastifiant		Ciment (Kg /m ³)	Eau (l/m ³)	Sable (Kg /m³)		Gravier (5/10) (Kg /m ³)	Fumée de silice (Kg /m ³)	E/L
	% / L	Kg /m ³			(0/2)	(3/6)			
BHP 1	1	12,07	450	145,8	734	326	798	45	0,27
BHP 2	0,8	12,73	450	162,5	710	300	710	100	0,25
BHP 3	0,77	9,77	450	147,5	890	-	900	70	0,28
BHP 4	0,6	8,34	500	147,2	730	300	730	70	0,23

III.1 Caractérisation rhéologique des BHP

Pour chacune des compositions présentées dans le tableau 38, on a réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- essais rhéologiques classiques : étalement, Boite en L, V-Funnel et stabilité au tamis;
- calcul de la viscosité et du seuil : V-Funnel & canal horizontal;

- résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours;
- évolution de la température en fonction du temps : Maturométrie.

Nous présenterons dans ce qui suit, les différentes étapes suivies et respectées pour la réalisation des essais sur les différentes compositions retenues.

Après le malaxage, la mise en place et la conservation des éprouvettes, les propriétés de chacune de ces compositions à l'état frais sont notées dans le tableau 39.

Tableau 39. Caractérisation rhéologique des BHP étudiés

<i>Caractérisations rhéologiques</i>					
<i>Bétons</i>	<i>Étalement (mm)</i>	<i>Temps d'étalement (s)</i>	<i>Boite en L (H2/H1)</i>	<i>Stabilité au tamis (%)</i>	<i>V-Funnel (s)</i>
BAP 7	725	4	0,92	8,8	13
<i>BHP1</i>	677	8	0,80	3,41	22
<i>BHP2</i>	770	3,6	0,98	16,6	18
<i>BHP3</i>	730	6,8	0,73	8,01	25
<i>BHP4</i>	750	5	0,98	6,74	14

Les essais de ségrégation (stabilité au tamis), à la boîte en L, au V-funnel et d'étalement ont été conduits selon les recommandations de l'AFGC- Bétons autoplaçants. Les réponses des tests de caractérisation réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans les figures suivantes (fig. 118-121) :

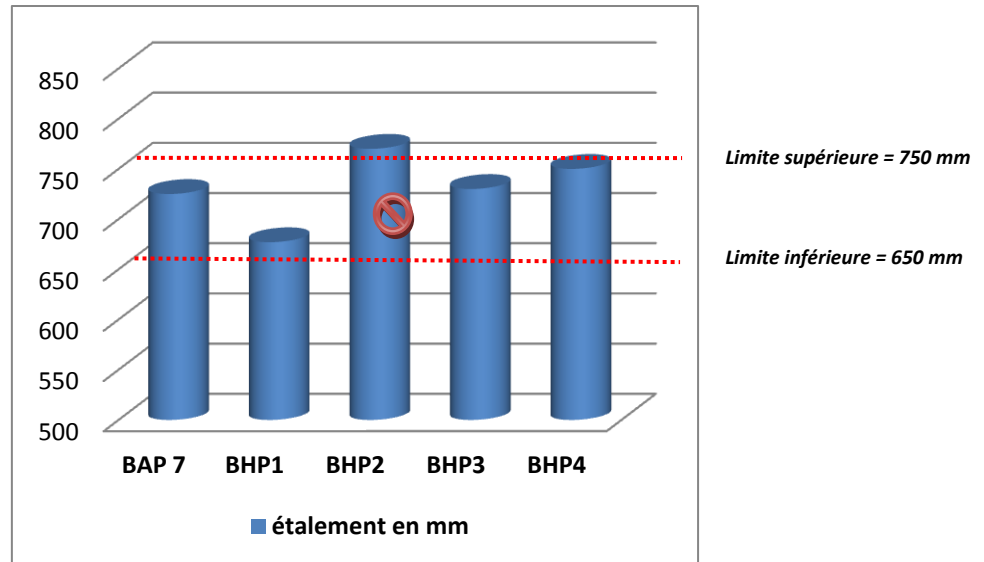


Fig.118. Résultats d'étalement des BAP.

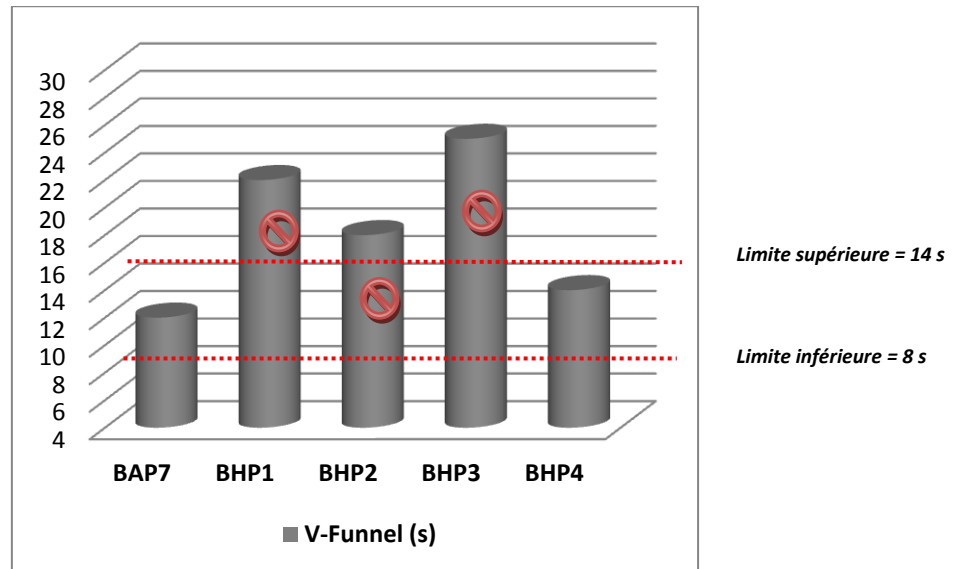


Fig. 119. Temps d'écoulement en V-Funnel des BAP.

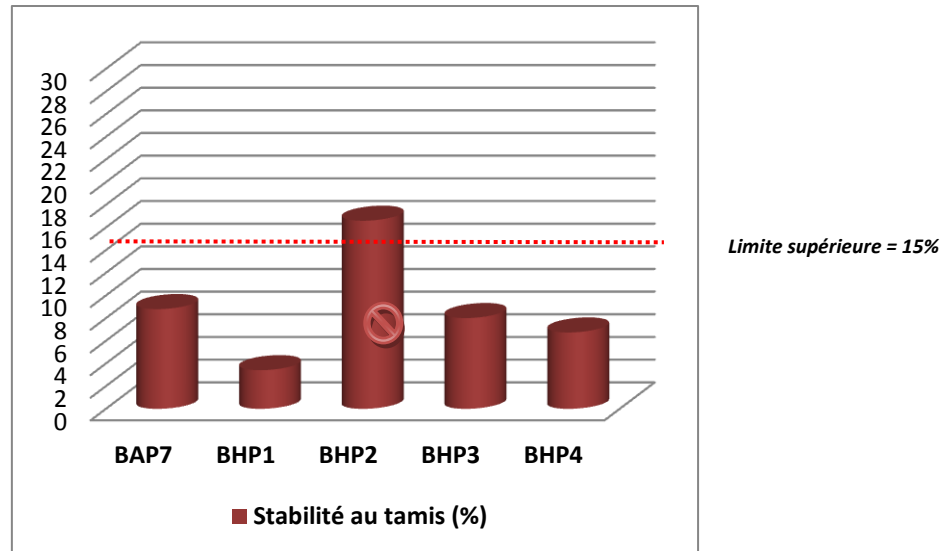


Fig. 120. Stabilité au tamis des BAP.

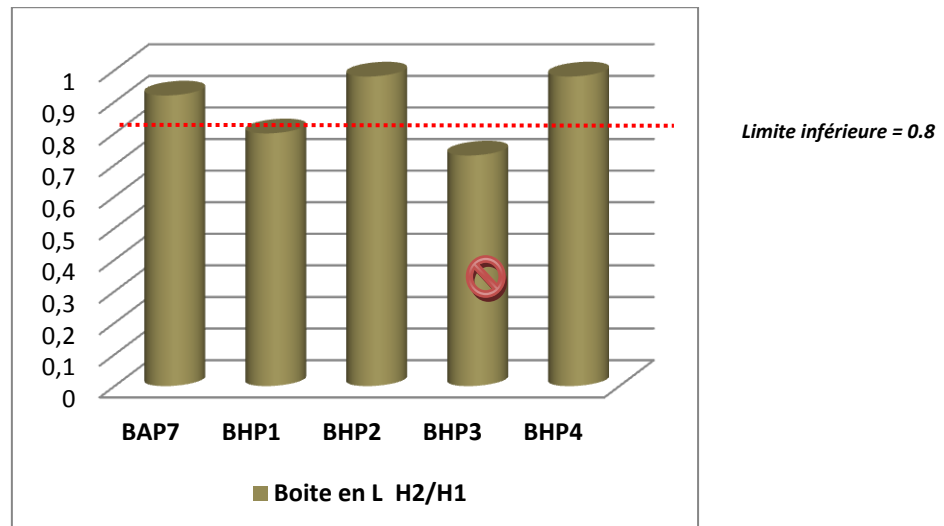


Fig. 121. Résultats d'essai Boite en L (H2/H1) des BAP.

Selon les recommandations de l'AFGC un béton autoplaçant devrait présenter à la fois un étalement supérieur ou égal à 60 cm, un rapport à la boite en L supérieur ou égal à 0,8 et une stabilité au tamis inférieure à 15%. On remarque que toutes les BHP possèdent un temps d'écoulement au V-Funnel supérieur à 14 secondes (hormis le BHP 4). Le BHP 4 respecte tous les recommandations, et donc, satisfait aux conditions requises pour être qualifié de béton autoplaçant.

Les réponses des tests de caractérisation rhéologique, en utilisant V-Funnel & canal horizontal en plexiglas, réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le

tableau 40. Les valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité sont présentées dans le tableau 41.

Tableau 40 : Caractérisation rhéologiques des BHP

BAP	Masse volumique <i>Kg/m³</i>	Temps V-Funnel <i>Tv (s)</i>	Temps canal horizontal <i>TL (s)</i>	Longueur d'écoulement L <i>(cm)</i>	Hf (cm)	Hi (cm)
BAP 7	2440	13	15	86,5	5,5	8
BHP1	2481	22	24	86,5	5,5	6,8
BHP2	2453	18,4	21	86,5	6,3	7
BHP3	2419	25	28	86,5	6,2	6,9
BHP4	2490	14	17	86,5	5,7	6,8

Tableau 41 : Valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité des BHP

BAP	Seuil de cisaillement <i>τ_0 (Pa)</i>	Viscosité plastique <i>(Pa.s)</i>
BAP 7	25,95	86,99
BHP1	13,04	144,26
BHP2	7,26	116,95
BHP3	7,10	156,97
BHP4	11,18	81,18

Comme on a mentionné dans la partie c'est-à-dire : les BAP qui respectent les recommandations de l'AFGC et les normes NF EN 12350 possèdent des seuils de cisaillement inférieurs à 35 Pa et des viscosités inférieures à 85 Pa.s. Cette remarque est bien respectée dans le cas de BHP 4 ($\tau_0=11.18$ Pa et $\nu = 81.18$ Pa.s).

En outre, le béton à haute performance a été utilisé comme matériau de structure dans beaucoup d'ouvrages et dans plusieurs pays. Dans le contexte local, l'utilisation des BHP reste tributaire d'une meilleure connaissance et maîtrise de ses propriétés à l'état durci.

III.2 Caractéristiques mécaniques des BHP à l'état durci

Trois éprouvettes cylindriques 16x32 cm, pour chaque mélange de béton ont été fabriquées pour l'évaluation de module d'élasticité en compression et coefficient de Poisson selon les normes ASTM C469-02e1 (tableau 42).

Tableau 42 : caractérisation mécanique des BHP

Bétons	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la flexion (MPa)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Masse volumique (Kg/m ³)
	1 jour	7 jours	28 jours					
BAP 7	46	64	70	4,2	5,69	48,02	0,311	2440
BHP1	49,6	58,4	79,1	5,3	6,18	50,21	0,332	2481
BHP2	55,9	78	107,2	6,1	6,26	55,25	0,310	2486
BHP3	60,5	73,9	96,2	5,5	7,77	53,40	0,332	2418
BHP4	73,8	92,6	130	6,2	8,01	58,72	0,310	2490

Les réponses des tests de la résistance à la compression réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans l'organigramme suivant :

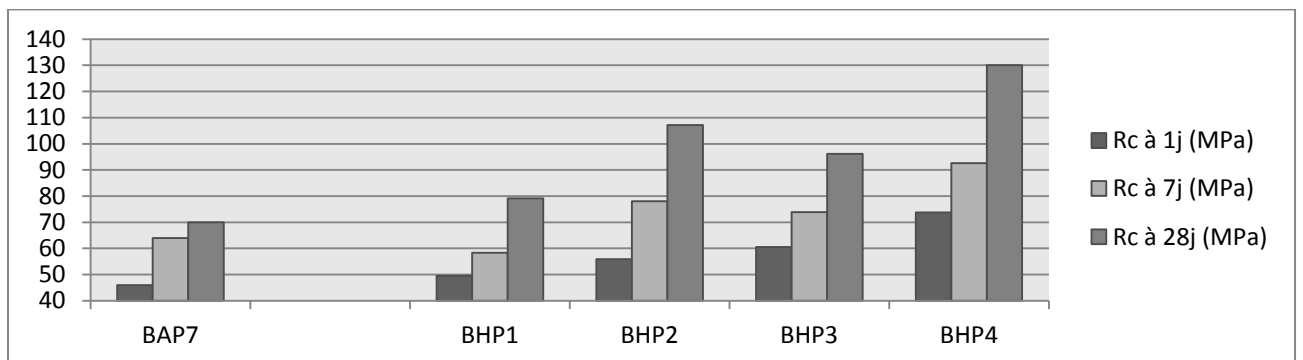


Fig. 122. Évolution des résistances à la compression en fonction du type de bétons

D'après la figure 122, on remarque que le BHP4 est le plus satisfaisant au niveau des caractéristiques mécaniques. Le BHP4 présente une amélioration de la résistance à la compression sur éprouvettes 16 x 32 cm de 37%, 30% et 46% par rapport à celui de BAP7 à 1, 7 et 28 jours respectivement. Le BHP4 possède une résistance à la compression, à 1 jour, de l'ordre de 73 MPa et de 130 MPa à 28 jours. Pour les autres paramètres le BHP4 présente un coefficient de Poisson de l'ordre de 0.310 et un module d'élasticité d'environ 58 GPa.

De plus, on remarque que pour le BHP4 le rapport RC_{1j} / RC_{28j} est de l'ordre de 56% ce qui montre que plus de la moitié de la résistance à la compression de ces bétons est acquise pendant les premiers jours, de coup, ces bétons présentent des améliorations notables à jeune âge. En outre, comme on le constate sur le tableau 39, le BHP4 satisfait aux conditions requises pour être qualifiées de béton autoplaçant pour cela on l'adopte, par la suite, comme bétons de référence pour les bétons fibrés à haute performance.

Généralement, le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil. Les fibres de différentes compositions incorporées au béton ont pour effet d'augmenter la résistance résiduelle du béton. Dans certains cas, l'utilisation de fibres permet de renforcer la structure. En général, les fibres permettent une meilleure répartition des contraintes mécaniques.

Cette partie présente les caractéristiques rhéologiques et l'amélioration des propriétés mécaniques du béton à haute performance par l'ajout des fibres.

IV. Bétons fibrés à hautes performances

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post-fissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

Les bétons qui ont fait l'objet de la présente étude sont des bétons à base de matériaux locaux. Le ciment utilisé est du type CEM I 52,5 R et le superplastifiant est de type KRONO 20. La conception de tous les bétons et tous les essais ont été réalisés au sein du laboratoire Génie civil de Polytech' Marseille. La formulation de

référence est celle dérivée de la meilleure formulation des BHP (BHP4). La composition ainsi que les notations des bétons conçus sont rassemblées dans le tableau 43.

Tableau 43: Compositions des BHP fibrés

Formulations		BHPF1	BHPF2	BHPF3	BHPF4
Fibres	Type	Micro-syn	Macro-syn	ESF 25	RC 50/80
	(Kg /m ³)	3	3	100	50
Superplastifiant	% / L	0,6	0,6	0,6	0,6
	(Kg /m ³)	8,34	8,34	8,34	8,34
Ciment (Kg /m ³)		500	500	500	500
Sable 0/2 (Kg /m ³)		730	730	700	710
Sable 3/6 (Kg /m ³)		300	300	300	300
Gravier 5/10 (Kg /m ³)		730	730	700	710
Fumée de silice (Kg /m ³)		70	70	70	70
Eau (l/m ³)		147,2	147,2	147,2	147,2
E/L		0,23	0,23	0,23	0,23

IV.1 Caractérisation rhéologique des BHPF

Le développement des bétons fibrés augmente le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton lors de l'écoulement. Les réponses des tests de caractérisation rhéologique réalisés sur les bétons confectionnés sont présentées dans le tableau 44.

Tableau 44 : caractérisation rhéologique des BHP fibrés

BHP-F	Étalement (mm)	Temps d'étalement (s)	Boîte en L (H2/H1)	Stabilité au tamis (%)	V-Funnel (s)
BHP4	725	4	0,92	8,8	14
BHPF1	475	-	-	1,17	60
BHPF2	580	7,2	-	2,22	-
BHPF3	665	16,7	-	7,25	54
BHPF4	695	9,2	-	3,37	-

Les essais d'étalement, à la boîte en L, au V-funnel et de ségrégation (stabilité au tamis) ont été conduits selon les recommandations de l'AFGC- Bétons autoplaçants.

On remarque que l'introduction des fibres conduit à une diminution appréciable de l'étalement, à une augmentation du temps d'écoulement au V-Funnel et à une diminution du pourcentage de laitance perdue à l'essai au tamis. Ceci s'explique par le rôle que jouent les fibres dans le mélange :

- l'étalement est diminué parce que les fibres, de part leur élancement, bloquent le système lors de son étalement (fig.123);

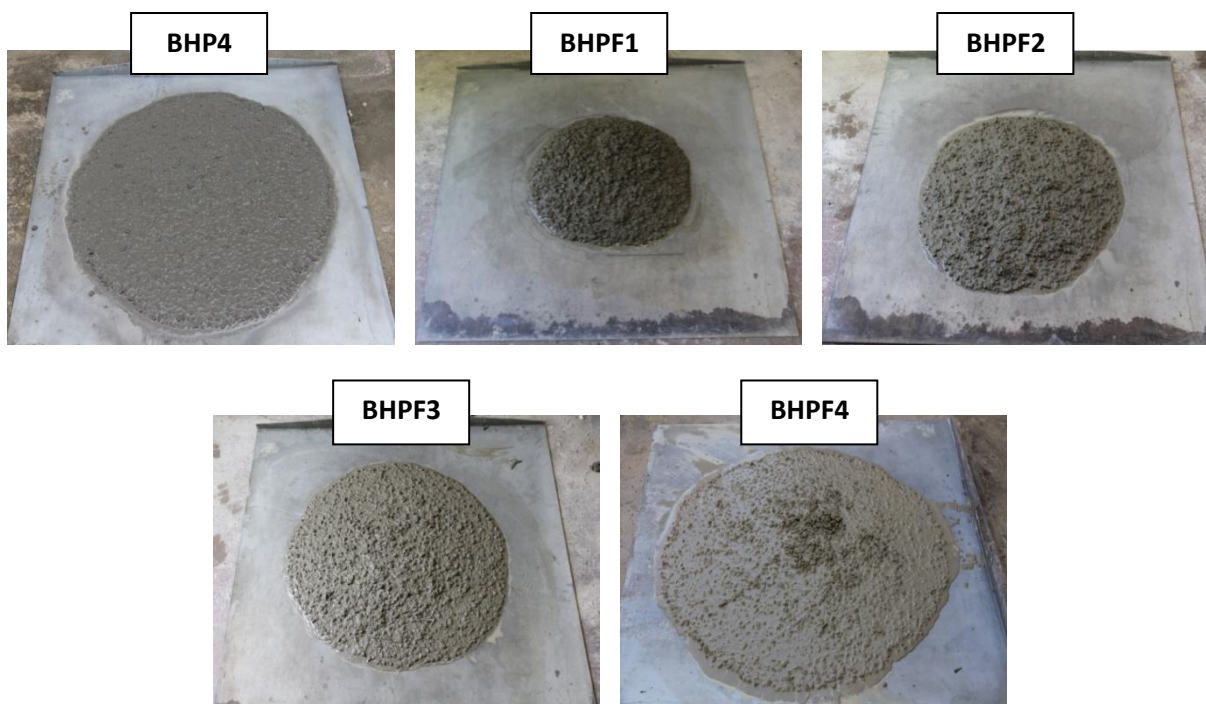


Fig. 123. Influence des fibres sur le diamètre d'étalement

- le temps au V-Funnel est considérable, parce que les fibres se chevauchent et forment des zones de blocage de l'écoulement.
- Quant au mouvement du béton dans la boîte en L, le système est rapidement bloqué par la formation de maillage très réduit au niveau des barres d'armatures de la boîte.

IV.2 Performances mécaniques des BHPF

Des performances mécaniques du béton, celles qu'on a étudiées sont la résistance à la compression et à la traction par flexion, que nous présentons dans ce qui suit :

Trois éprouvettes 16x32 cm sont testés pour chaque échéance d'essais. Les effets du type des fibres sur le béton peuvent être quantifiés. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 46.

Tableau 46: caractérisation mécanique de BAPF à l'état durci.

<i>Caractérisations mécaniques</i>								
<i>Bétons</i>	<i>Résistance à la compression (MPa)</i>			<i>Résistance à la traction (MPa)</i>	<i>Résistance à la flexion (MPa)</i>	<i>Module d'Young (GPa)</i>	<i>Coefficient de Poisson</i>	<i>Masse volumique (Kg/m³)</i>
	<i>1 jour</i>	<i>7 jours</i>	<i>28 jours</i>					
<i>BHP4</i>	73,8	92,6	130	6,2	8,01	58,72	0,310	2490
<i>BHPF 1</i>	54,2	73,4	89,2	5,3	8,18	58,21	0,332	2482
<i>BHPF 2</i>	52,9	70,1	90,6	7,1	12,55	59,25	0,320	2484
<i>BHPF 3</i>	73,1	90,4	126,2	6,3	17,75	59,40	0,352	2498
<i>BHPF 4</i>	75,7	88,1	128,6	8,2	9,19	59,72	0,310	2492

Les résultats présentés dans le tableau 46 permettent l'étude des influences suivantes :

- sur la figure 124, les résistances en compression sont présentées en fonction du temps. En analysant les courbes de cette figure, on peut voir que les résistances des bétons en fonction du temps sont quasiment croissantes.

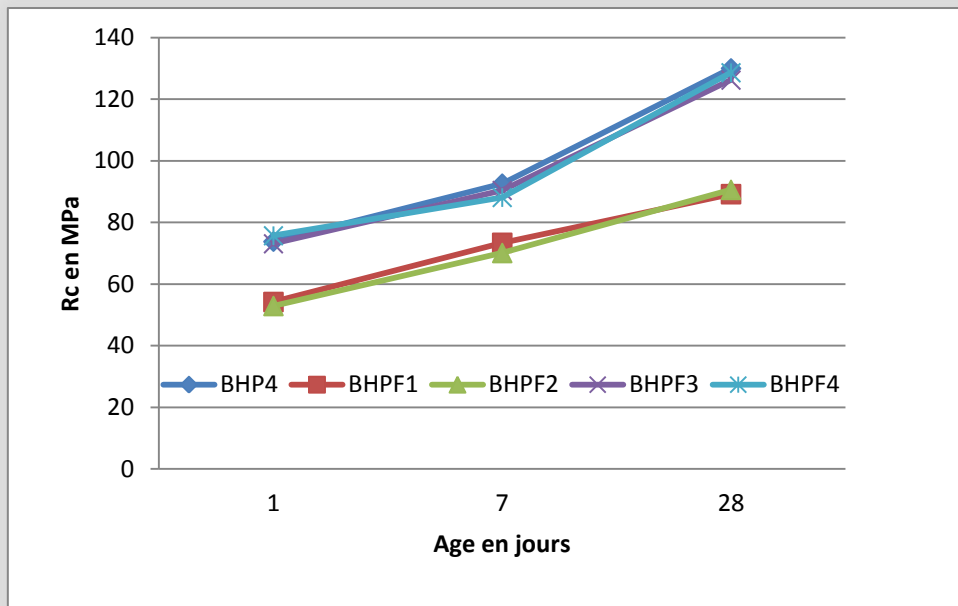


Figure 124. : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps

Le comportement en compression n'est que peu influencé par la présence des fibres métalliques. Les fissures créées ne permettent pas aux fibres d'être sollicitées suffisamment pour améliorer significativement le comportement du béton.

Pour tous les bétons présentés dans le tableau 46, le rapport RC_{1j} / RC_{28j} est de l'ordre de 56% ce qui montre que plus de la moitié de la résistance à la compression de ces bétons est acquise pendant les premiers jours, de coup, ces bétons présentent des améliorations notables à jeune âge.

Par contre les fibres micro et macro synthétiques présentent les faibles résistances, surtout au jeune âge, dû à la manque de cohésion entre la fibre et la matrice cimentaire (fig. 125). Par exemple, pour le BHPF (avec des fibres synthétiques) la résistance, à un jour, est de l'ordre de 50 MPa, alors que pour le BHP (sans fibres) et le BHPF (avec des fibres métalliques), la résistance, à un jour, dépasse 70 MPa (fig. 126).

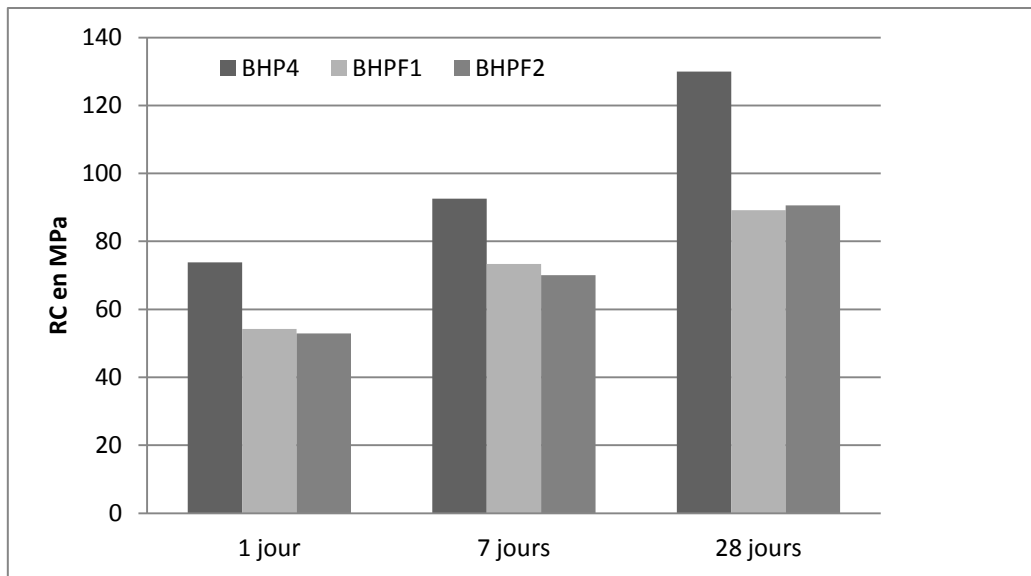


Fig. 125. Influence de fibres synthétiques sur la résistance à la compression

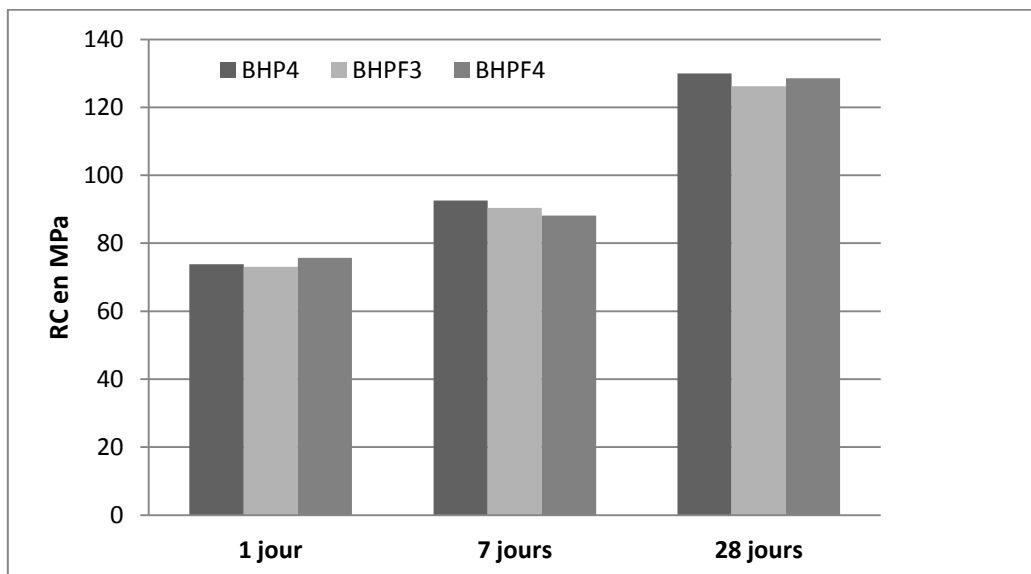


Fig. 126 : Influence de fibres métalliques sur la résistance à la compression

Sur la figure 126 on peut remarquer que l'introduction de fibres métalliques n'affecte pas beaucoup la résistance à la compression des BAP, et cela est vrai quel que soit l'âge du béton.

- L'introduction de fibres dans la composition d'un BHP permet une augmentation considérable de sa résistance à la traction par flexion. Sur la figure 127, on remarque qu'à 28 jours la résistance à la traction par flexion des bétons BHPF2 et BHPF3 ont augmenté respectivement de 36% et 54% suite à l'introduction de fibres macro-synthétiques et métalliques ESF25 dans leurs compositions.

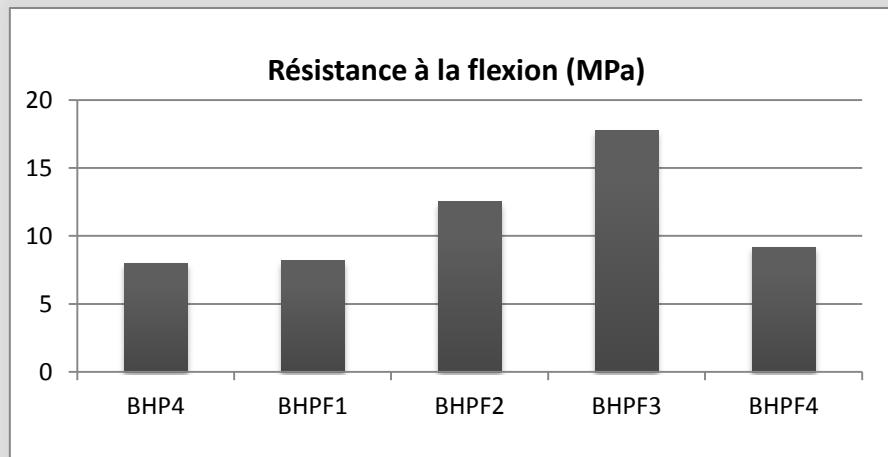


Figure 127 : La résistance mécanique à la flexion des BHP fibrés

Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques favorise la ductilité du béton. En outre, c'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres métalliques sont sollicitées, les fibres apportent alors une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmentent ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration.

Un des principaux avantages de l'ajout des fibres est le meilleur contrôle de la postfissuration du béton. Les fibres ont la particularité d'absorber l'énergie de fissuration et de redistribuer les contraintes mécaniques dans la matrice du béton. La répartition des fibres dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile du béton en s'opposant à la propagation des microfissures.

En résumé, l'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré.

En outre, le béton est un matériau vieillissant, ce qui signifie que ses propriétés mécaniques (module d'élasticité, résistance) évoluent en fonction de l'avancement de la réaction d'hydratation du ciment (réaction exothermique).

Au cours de la partie suivante, nous étudions l'évolution physico-chimique et mécanique des bétons étudiés (BAP, BHP et BHPF). Nous avons mesuré le dégagement de chaleur d'hydratation et les propriétés mécaniques (résistance à la compression) au jeune âge. Pour chaque essai, nous analysons l'influence de la composition sur l'évolution de la température des bétons : BAP7, BHP4, BHPF1 (avec des fibres synthétiques), BHPF4 (avec des fibres métalliques).

V. Maturométrie

L'hydratation commence dès que le ciment entre en contact avec l'eau. Chaque phase pure du ciment a une chaleur d'hydratation bien définie, donnée dans le tableau 47.

Tableau 47: Chaleur d'hydratation des phases du ciment [210]

Phase minérales	C3S	C2S	C3A	C4AF
Chaleur d'hydratation (J/mol)	510	260	1100	410

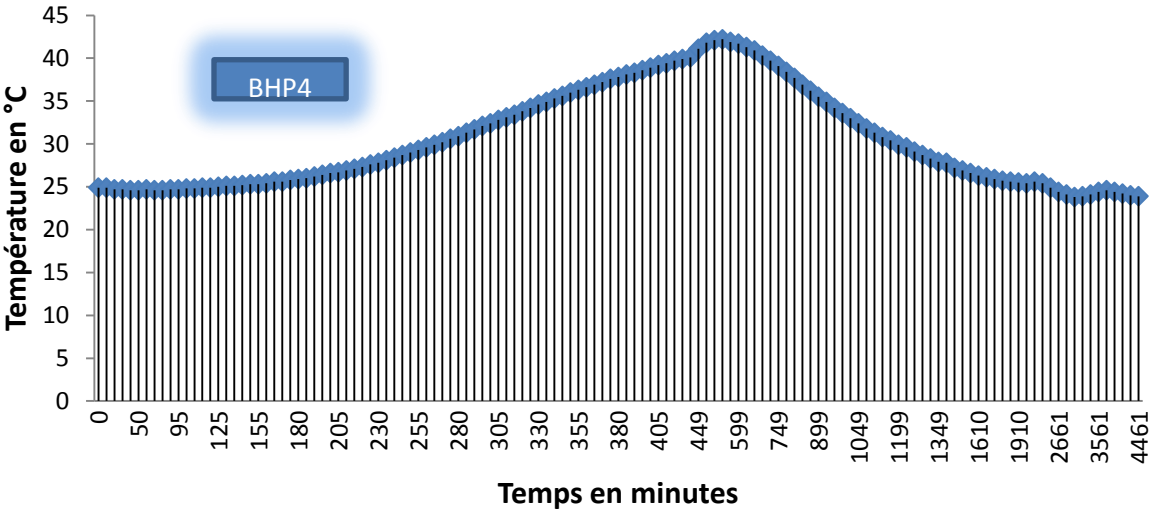
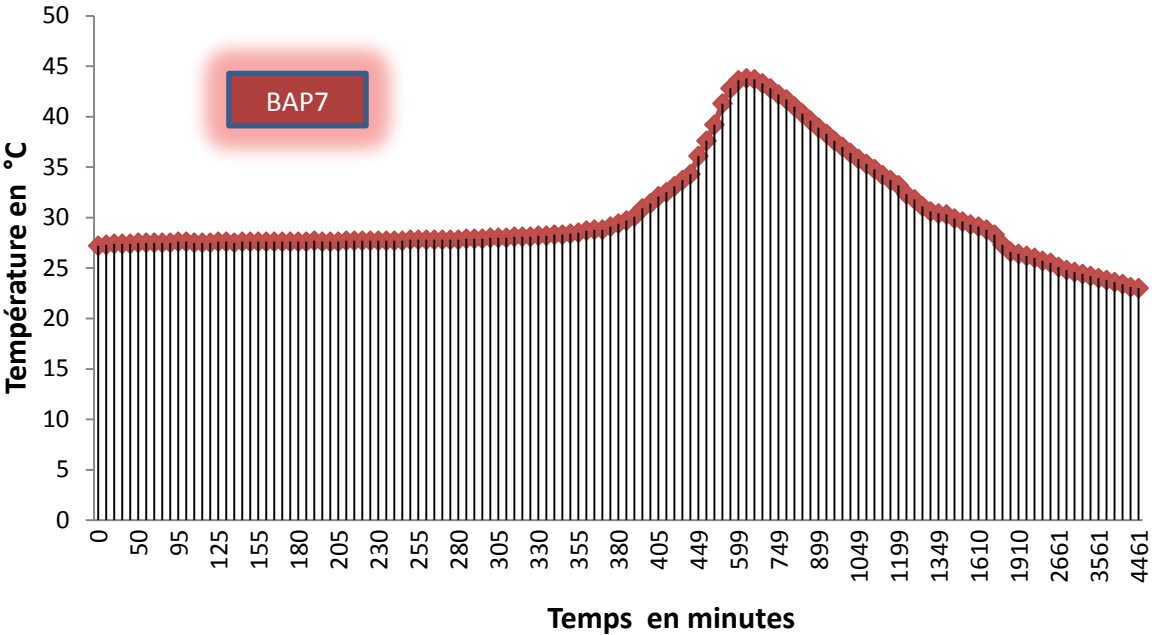
Afin de quantifier ce dégagement de chaleur, nous avons placé un échantillon en conditions semi-adiabatiques et nous avons mesuré à l'aide d'un thermocouple l'évolution de la température au sein de celui-ci durant trois jours. La figure 128 présente le dispositif de l'essai.



Fig. 128 : Dispositif de mesure de température au cours de la prise

La méthode consiste à introduire une quantité de béton, dès la gâchée, dans un récipient isolant (Thermos) afin de déterminer l'évolution de la température.

Les courbes d'échauffement obtenues pour les bétons étudiés sont tracées sur la figure 129.



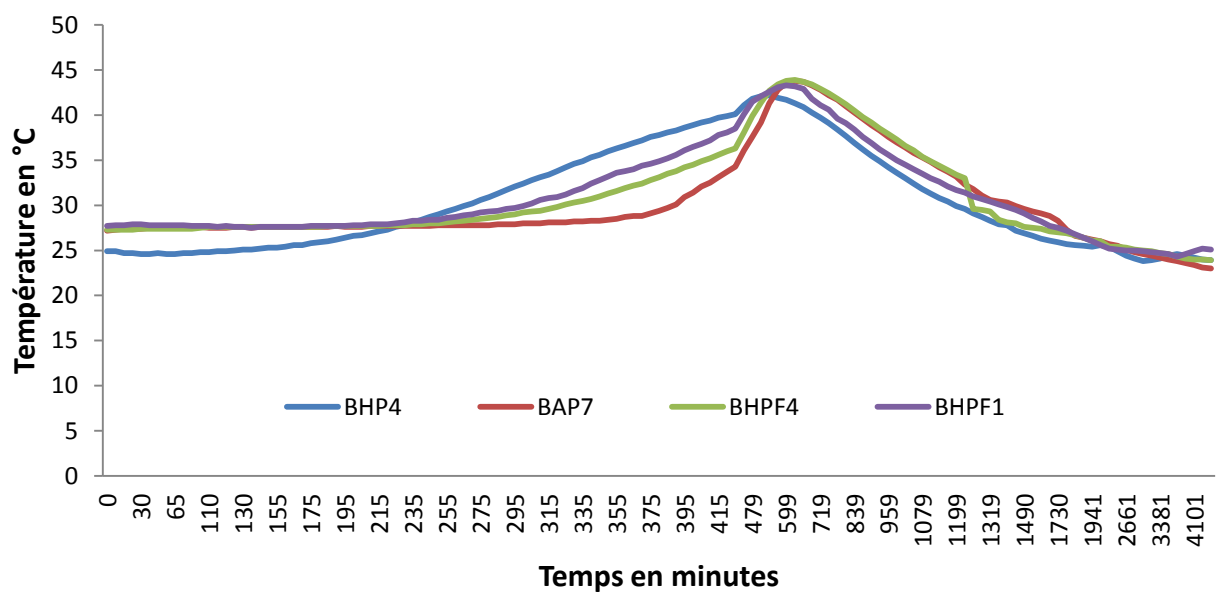
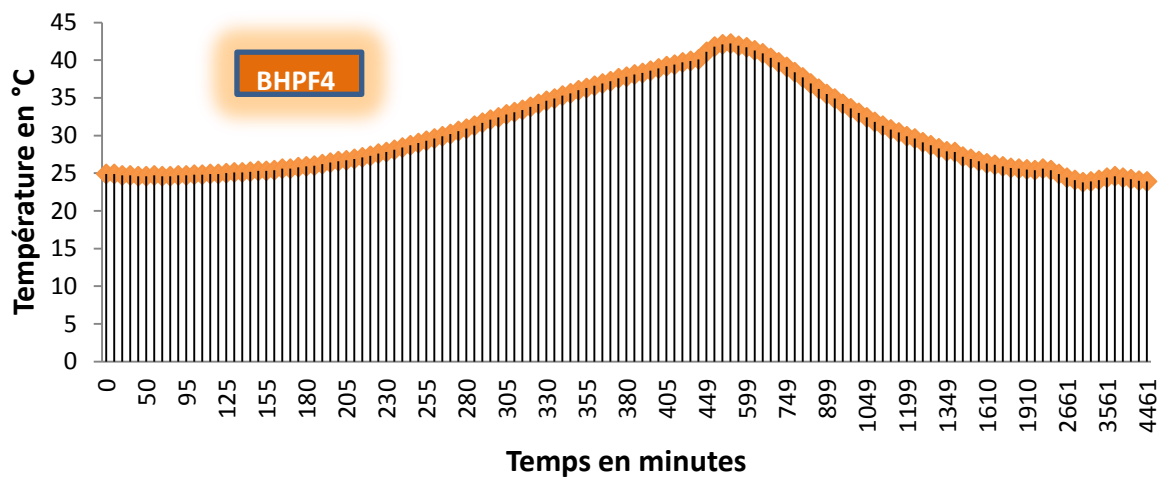
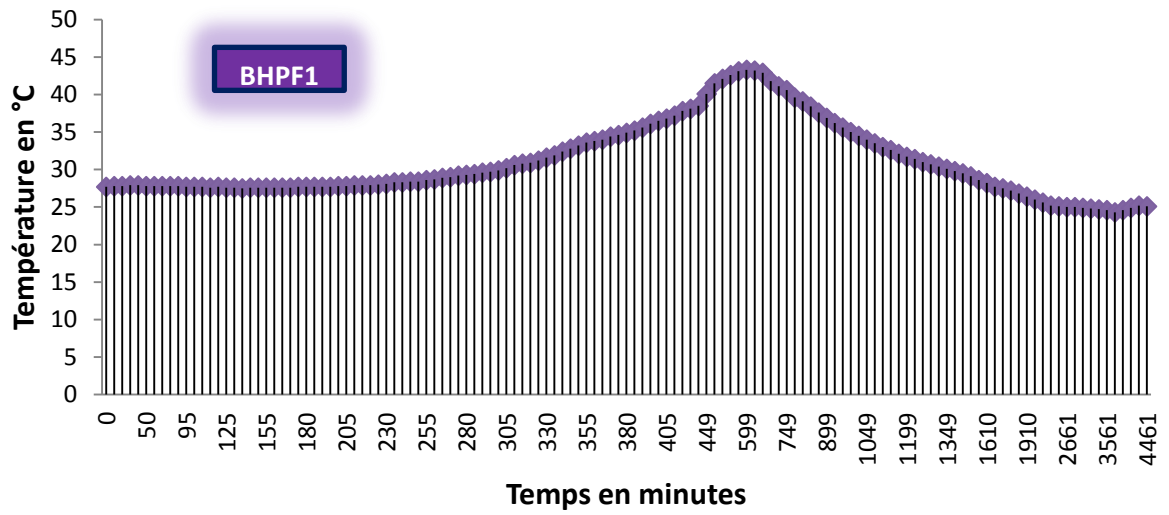


Fig. 129. Courbes d'évolution temporelle de la température des bétons

La figure 129 montre l'évolution de la température au cours des trois jours des bétons BAP7, BHP4, BHPF1 et BHPF4. On peut constater que le dégagement de chaleur du BAP7 est plus lent et moins intense que celui du BHP4, BHPF1 et BHPF4, même si la température initiale est différente de 3°C environ (par rapport à BHP4).

Sur ces figures, pour le BAP7, on constate qu'au bout de 6 heures d'essai, la chaleur d'hydratation commence à augmenter, alors que pour le BHP4, BHPF1 et BHPF4 la température augmente au bout de 2 heures, 4 heures et 3 heures, respectivement. Cela vient du fait que pour les bétons autoplaçants la prise étant plus lente grâce à l'ajout de filler calcaire et donc le dégagement de chaleur est également plus lent. Par contre l'ajout de la fumée de silice dans le cas de béton à haute performance accélère les réactions d'hydratation grâce à son effet pouzzolanique.

En plus, la quantité de chaleur dégagée pendant l'hydratation dépend de la quantité de ciment dans le béton. La chaleur dégagée par le BHP4 est plus importante que les chaleurs dégagées par le béton BAP7, ceci s'explique par le fait que la proportion de ciment contenue dans le BHP4 est plus importante.

Les recherches sur les processus de développement de la résistance du béton sont nombreuses. L'évolution des propriétés d'un béton dépend de plusieurs facteurs, mais pour une formulation de béton donnée, la température constitue au jeune âge le facteur influençant le plus l'hydratation du ciment. La maturométrie repose donc sur l'utilisation d'une « fonction de maturité » qui considère uniquement le temps et l'histoire de température que subit le béton.

V.1 Influence de la température

L'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge et des quatre températures de cure est décrite au tableau suivant.

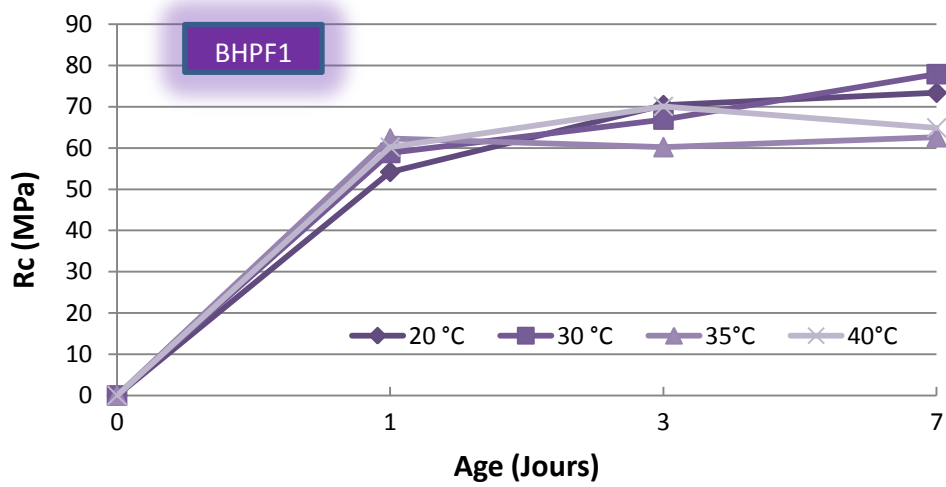
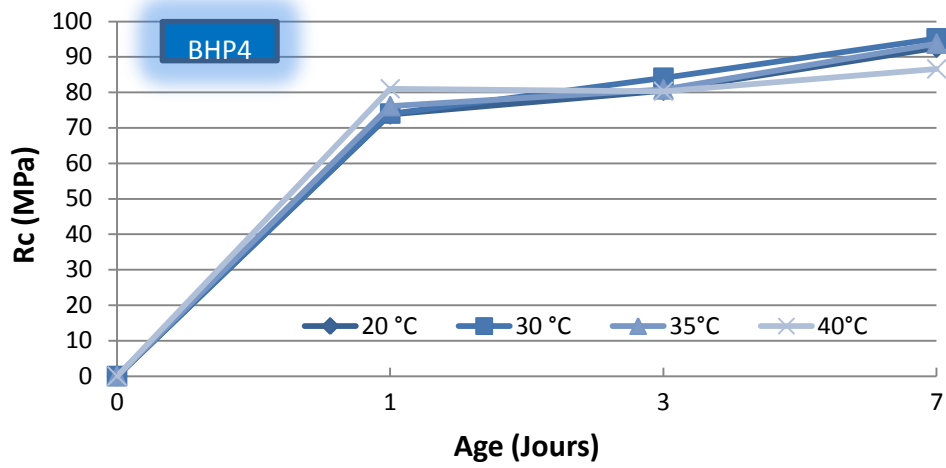
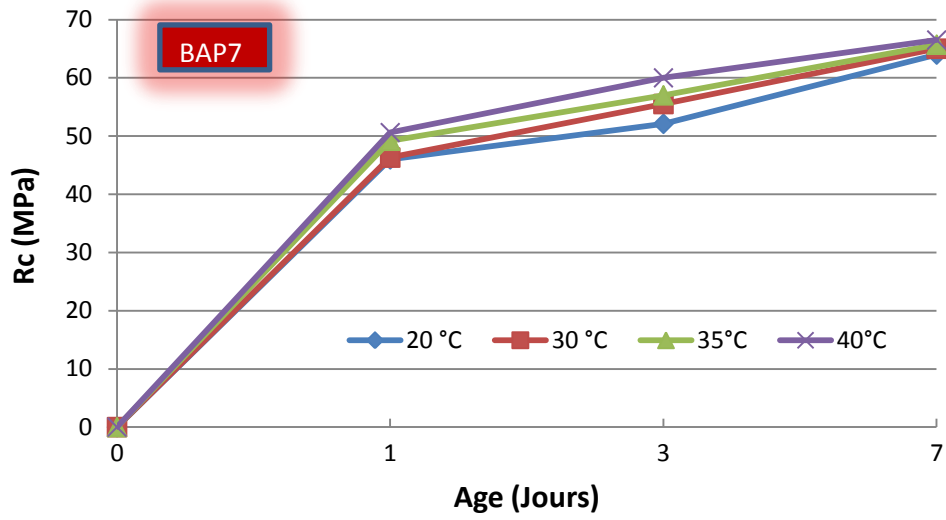
Tableau 48. Evolution de la résistance en fonction de la température

Bétons	20°C			30°C			35°C			40°C		
	1 j	3 j	7 j	1 j	3 j	7 j	1 j	3 j	7 j	1 j	3 j	7 j
BAP7	46,0	52,1	64,0	46,3	55,5	65,0	49,2	57,0	65,7	50,6	60,0	66,5
BHP4	73,8	80,5	92,6	74,0	84,1	95,2	76,1	80,8	93,7	81,0	80,3	86,6
BHPF1	54,2	60,4	73,4	58,8	66,9	77,9	62,3	60,2	62,6	60,2	70,1	64,9
BHPF4	75,7	80,8	88,1	76,2	84,3	92,3	77,6	73,7	78,2	78,2	68,4	74,6

Dans les premières heures qui suivent la fabrication des pâtes de ciment, on observe qu'un accroissement de la température de cure se traduit par une résistance à la compression plus élevée. L'augmentation de la température de cure est seulement bénéfique pour la résistance au très jeune âge. Ensuite il se produit un effet de croisement des courbes de résistance (fig. 130). Ces croisements de courbe indiquent que la température n'a pas simplement un effet d'accélération des propriétés mais provoque également une modification des propriétés intrinsèques, de la morphologie et de l'agencement des hydrates formés. Voir les travaux de Verbeck et al., 1968 [211] ; Kjellsen et al., 1991 [212], Barnett et al., 2006 [172].

L'hydratation rapide causée par la température élevée engendre de grandes concentrations d'hydrates dans les zones environnant les grains de ciment et la formation de larges pores entre les grains. L'augmentation du diamètre des pores pour des températures élevées (Kjellsen et al., 1991 [212] ; Eren, 2002 [213]; Ho et al., 2003 [214]) se traduit par une diminution de la résistance par rapport au matériau curé à température faible (c'est le cas de BHP4, BHPF1 et BHPF4).

On peut constater ce phénomène sur les résistances obtenues à 7 jours présentées à la figure 131 : l'augmentation de la température ne génère pas une augmentation de la résistance à plus long terme, quelle que soit la composition étudiée.



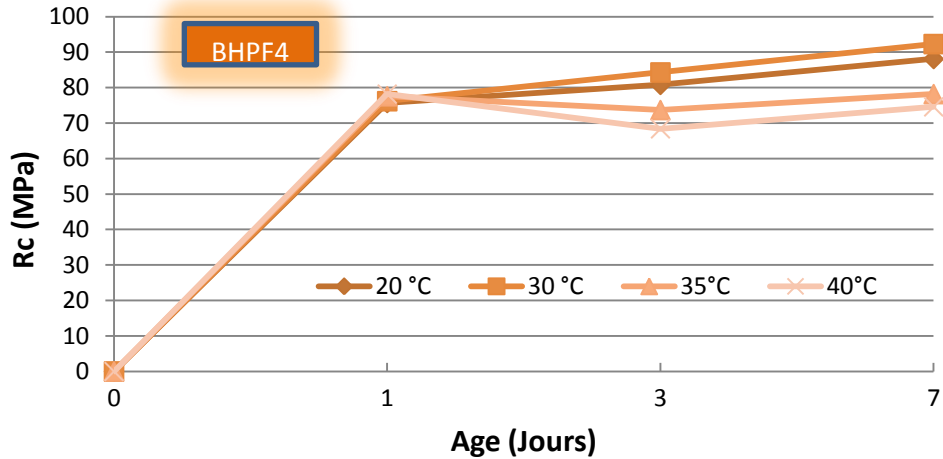


Fig. 130. Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de la température de cure

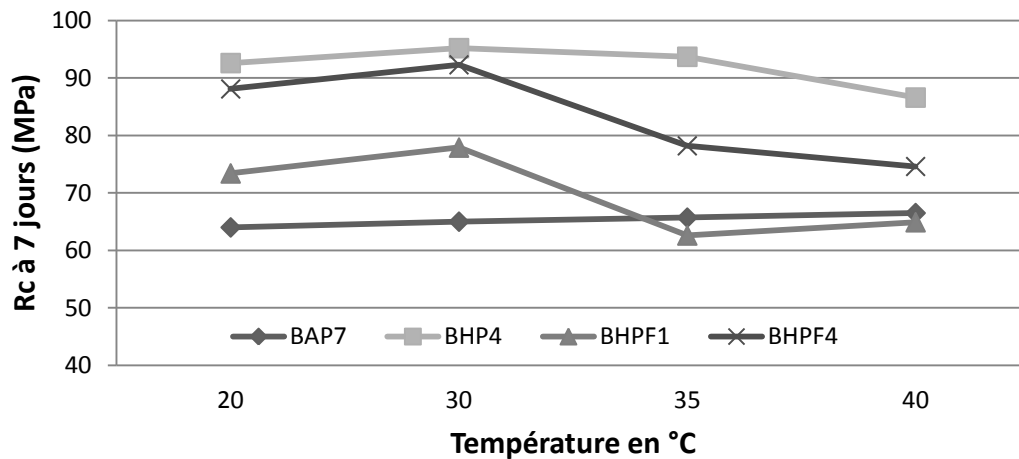


Fig. 131. Evolution de la résistance à la compression à 7 jours en fonction de la température de cure.

La fonction la plus utilisée est celle basée sur la loi générale d'accélération des réactions chimiques en fonction de la température proposée par Arrhenius. Cette fonction a l'avantage d'être très performante mais nécessite la connaissance d'un autre paramètre : « l'énergie d'activation du béton ».

V.2 Détermination de l'énergie d'activation E_a

Comme mentionné dans la partie, l'équation suivante (équation V.2) décrit l'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps :

$$R(t) = \frac{R_u \cdot k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)}$$

Avec t_0 le temps initial au développement de la résistance (h), k la constante de réaction (1/h), R_u la résistance à la compression ultime (MPa) (dans notre cas, nous prendrons la résistance à 28 jours). Pour la valeur de $R(t)$, on a choisi $R(t) = 50\text{MPa}$.

- Pour le BAP7 : $t_0 = 6$ heures
- Pour le BHP4 : $t_0 = 4$ heures
- Pour le BHPF1 : $t_0 = 4$ heures
- Pour le BHPF4 : $t_0 = 4$ heures

En exploitant les résultats expérimentaux déterminés à partir de la relation (équation V.2) en fonction des résultats expérimentaux présentés ci-dessus, on peut alors calculer pour chaque température et chaque composition étudiée, une valeur de k . Ces valeurs sont récapitulées dans le tableau 49. Le temps nécessaire pour développer $R(t)$ est donné aussi dans le tableau 49.

Tableau 49. Récapitulatif des valeurs de k et de t pour les différentes compositions

Compositions		20°C	30°C	35°C	40°C
BAP7	t (h)	56	40	32	21,6
	K (1/h)	0,0500	0,0817	0,1202	0,2137
BHP4	t (h)	21,6	21,12	20	16,8
	K (1/h)	0,0355	0,0383	0,0430	0,0599
BHPF1	t (h)	22,8	20	19,2	16,8
	K (1/h)	0,0678	0,0941	0,2043	0,3367
BHPF4	t (h)	19,2	19	18,72	18
	K (1/h)	0,0419	0,0449	0,0499	0,0631

Les figures 132 à 135 présentent l'évolution de $\ln(k)$ en fonction de $1/\text{Température}$ pour les quatre compositions étudiées. On constate que l'alignement des points obtenus est satisfaisant.

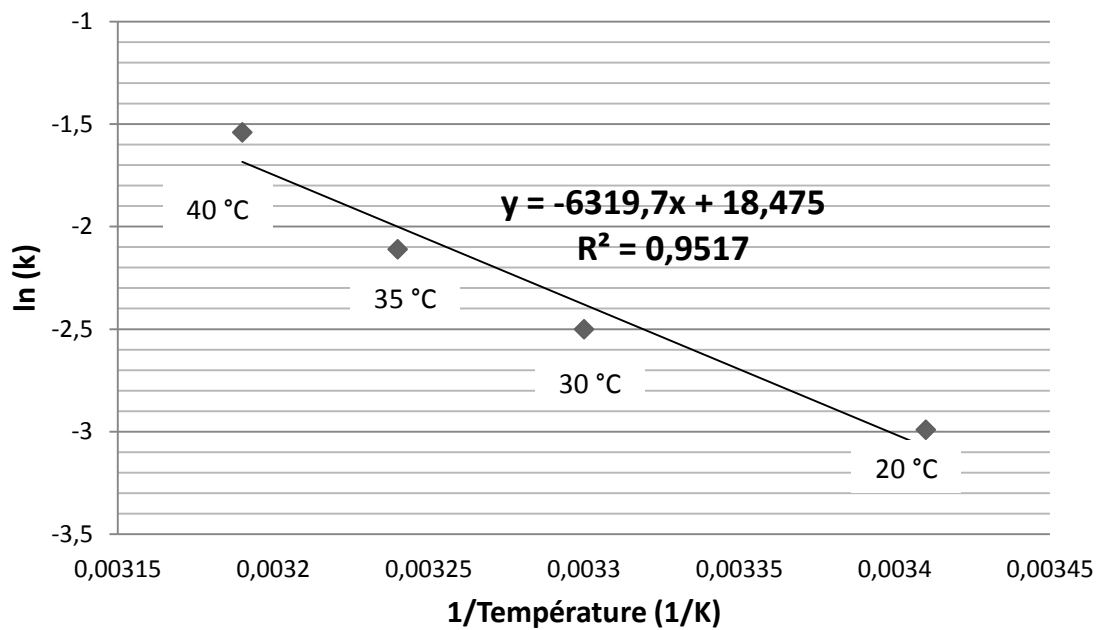


Fig. 132. Application du concept de maturité pour la résistance à la compression de BAP7

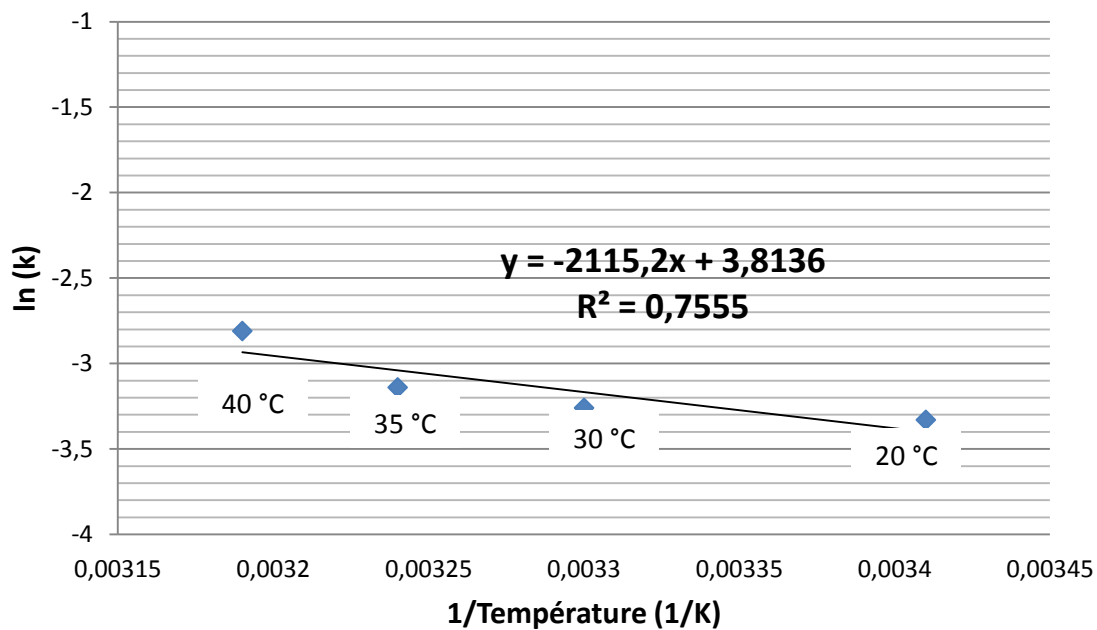


Fig. 133. Application du concept de maturité pour la résistance à la compression de BHP4

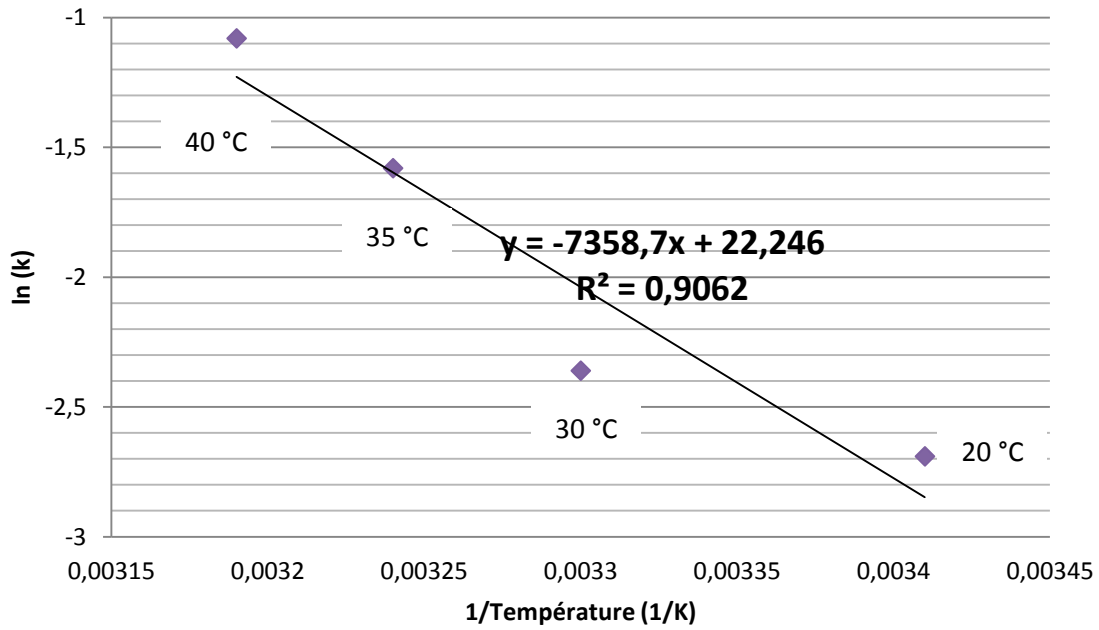


Fig. 134. Application du concept de maturité pour la résistance à la compression de BHPF1

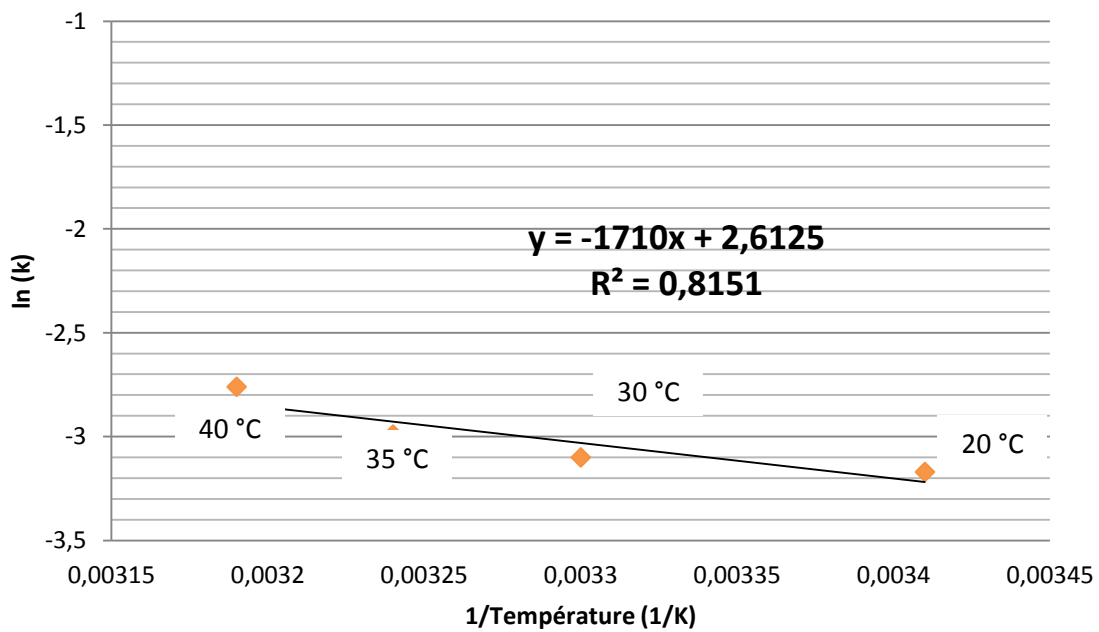


Fig. 135. Application du concept de maturité pour la résistance à la compression de BHPF4

Le tableau 50 récapitule les valeurs des énergies d'activation obtenues avec les essais de résistance en compression.

Tableau 50. Récapitulatif des énergies d'activation pour les différentes compositions

Compositions	Energie d'activation Ea (J/mol)
BAP7	52536
BHP4	17584
BHPF1	61174
BHPF4	14216

V.3 Exemple de calcul de l'âge équivalent sur la base d'un suivi thermique

Dans ce calcul, on détermine l'âge équivalent à 20 °C correspondant à chaque échéance de mesure de la température. L'enregistrement de température se présente le plus souvent sous la forme d'un tableau à deux colonnes. Dans la première sont indiquées les âges t_i du béton auxquels sont faites les mesures, les températures mesurées T_i à ces échéances se situant dans la seconde. Le calcul de l'âge équivalent à l'échéance n° i se fait par la formule suivante :

$$teq_n = \sum_{i=1}^n \left\{ \exp \left[-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{273 + \frac{T_i + T_{i-1}}{2}} - \frac{1}{293} \right) \right] \cdot (t_i - t_{i-1}) \right\}$$

Le tableau suivant résumé un exemple de calcul maturométrique :

Tableau 51. Calcul de l'âge équivalent : suivi thermique des bétons étudiés à 5 heures

Bétons	Données		Calculs			
	Age t_i (h)	T_i (°C)	$T_{i,moy}$ (K) $273 + \frac{T_i + T_{i-1}}{2}$	Δt_i (h)	$\exp[...] * \Delta t_i$ (h)	t_{eq} (h)
BAP7	0	27,2	-	-	-	0
	5	28,7	300,95	$5 - 0 = 5$	$1,77 * 5$ $= 8,85$	$0 + 8,85$ $= 8,85$
BHP4	0	24,9	-	-	-	0
	5	36,6	303,75	$5 - 0 = 5$	$1,29 * 5$ $= 6,45$	$0 + 6,45$ $= 6,45$
BHPF1	0	27,3	-	-	-	0
	5	31,9	302,6	$5 - 0 = 5$	$2,22 * 5$ $= 11,1$	$0 + 11,1$ $= 11,1$
BHPF4	0	27,7	-	-	-	0
	5	33,8	303,75	$5 - 0 = 5$	$1,23 * 5$ $= 6,15$	$0 + 6,15$ $= 6,15$

Connaissant le temps équivalent, on peut déterminer la résistance du béton à n'importe quel âge en se référant à la courbe de référence qui doit être déjà établie

La « courbe de référence d'un béton » est une courbe qui présente l'évolution des résistances à la compression d'un béton aux jeunes âges en fonction de son âge équivalent à 20°C. Cette courbe est réalisée à partir de casses d'éprouvettes conservées en général à 20°C ($R_c=f(4h, 8h, 12h, 24h, 32h, 48h, 72h, 28\text{jours})$). Voir figures 136-139.

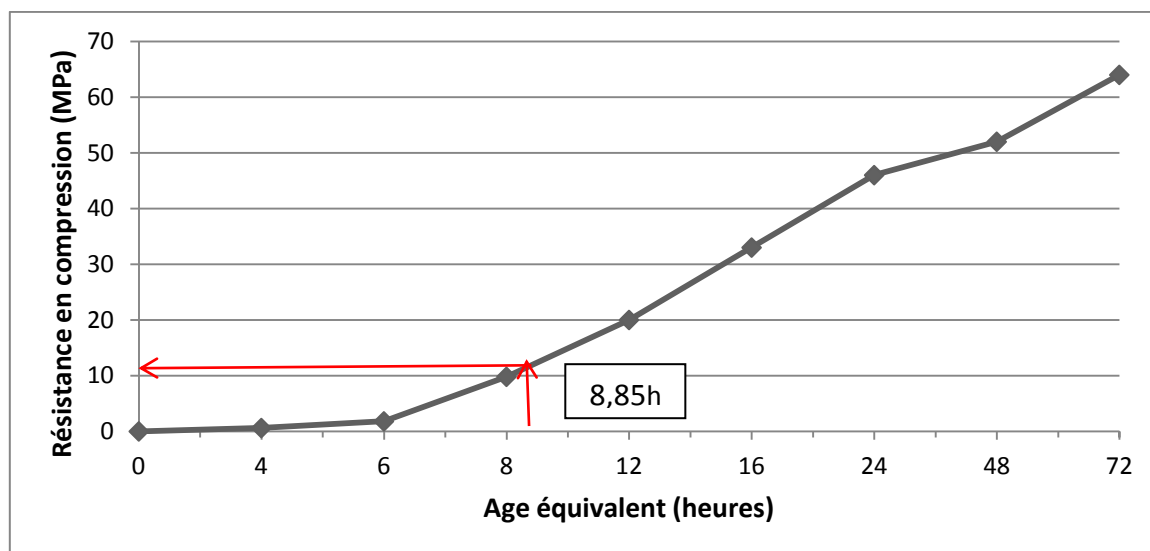


Fig. 136. Représentation schématique de la courbe de référence BAP7

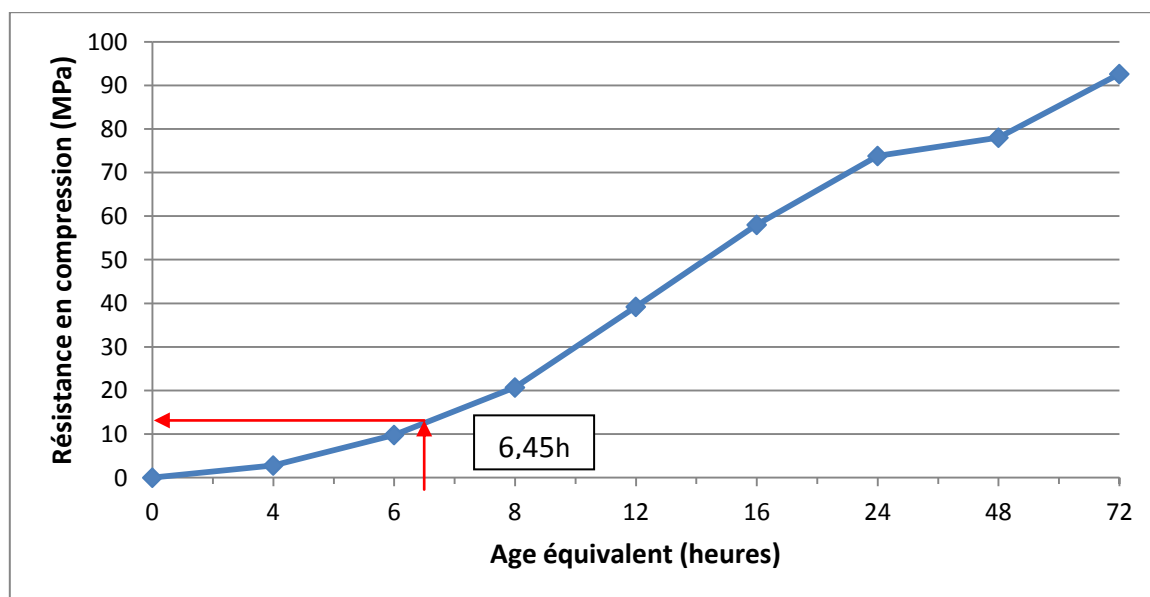


Fig. 137. Représentation schématique de la courbe de référence BHP4

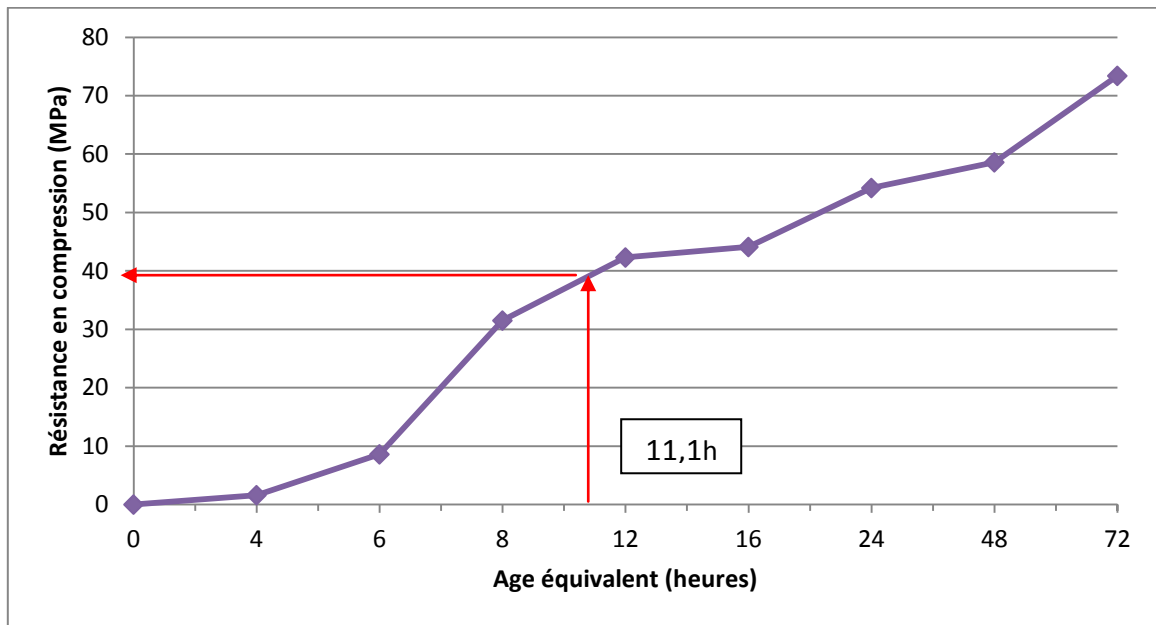


Fig. 138. Représentation schématique de la courbe de référence BHPF1

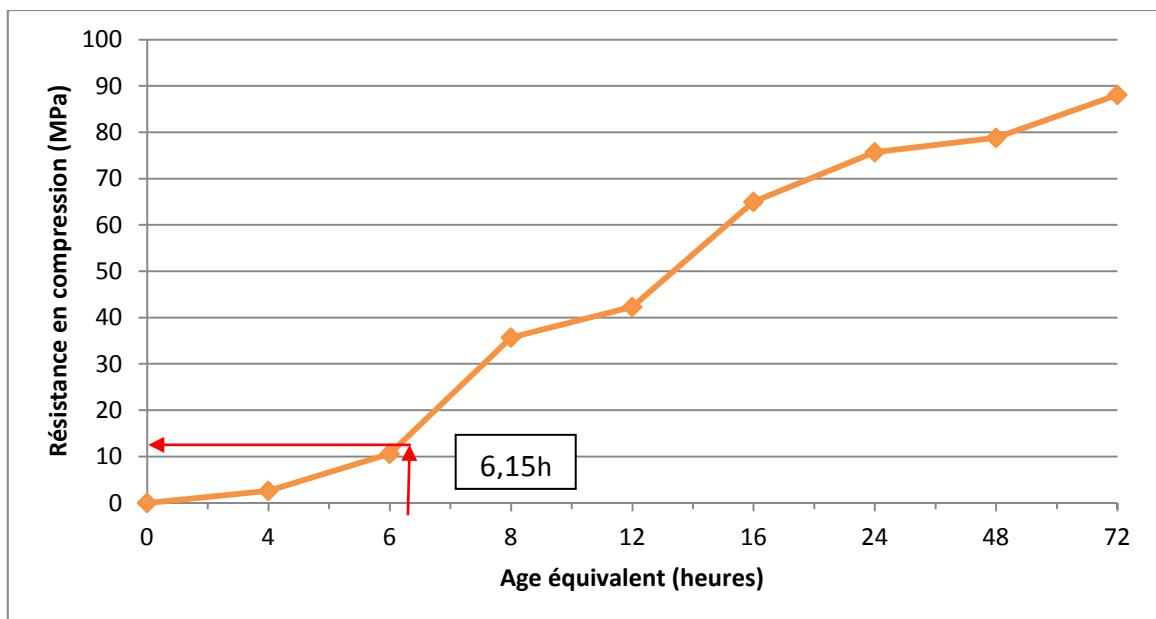


Fig. 139. Représentation schématique de la courbe de référence BHPF4

Connaissant l'histoire de température vécue par le béton, on peut convertir l'âge réel en âge équivalent à 20°C, et donc exprimer les résistances à la compression du béton en fonction de son âge équivalent.

Conclusion générale

La composition du mélange, le rapport E/C, la nature du ciment et du superplastifiant affectent le comportement rhéologique du béton. En isolant chacun de ces facteurs, il est possible de distinguer des tendances générales à savoir quel sera leur effet sur le seuil de cisaillement ou sur la viscosité plastique (en utilisant le cône de Marsh et le canal horizontal en plexiglas). Cependant, ces facteurs ne sont pas indépendants les uns par rapport aux autres et la prédiction du seuil de cisaillement et/ou de la viscosité devient relativement compliquée quand tous les facteurs sont considérés.

En comparaison avec les bétons ordinaires les bétons fluides doivent avoir un seuil d'écoulement faible pour que l'écoulement s'amorce rapidement et leur viscosité doit être modérée pour limiter le temps d'écoulement. C'est pourquoi il est nécessaire : (1) de remplacer une partie du ciment par des additions minérales qui engendrent une diminution du seuil de cisaillement; (2) d'utiliser un superplastifiant pour augmenter significativement la fluidité des bétons que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement.

D'une manière pratique, il est possible de fabriquer des bétons fluides avec les matériaux locaux présentant les mêmes composants de base qu'un béton normal et permettant ainsi d'obtenir les mêmes caractéristiques que celles recommandées par les normes européennes. Cependant les exigences que doit satisfaire un béton autoplaçant par rapport à un béton vibré sont sensiblement plus élevées en ce qui concerne sa caractérisation rhéologique.

☞ À l'état frais, pour évaluer la viscosité des bétons fluides, plus précisément les BAP, plusieurs essais normalisés sont recommandés. Mais, les essais rhéologiques les plus couramment utilisés pour caractériser le béton autoplaçant donnent une seule indication sur le comportement du béton, par exemple : le test de la boîte en L caractérise la capacité d'un béton frais à remplir un coffrage ferrailé, le test de la stabilité au tamis indique la ségrégation statique du béton, l'essai d'étalement caractérise la capacité de remplissage du béton dans un milieu non ferrailé et le V-Funnel donne une indication sur la viscosité du béton en calculant le temps d'écoulement. Par contre, l'avantage principal de notre outil expérimental (écoulement de béton dans un V-Funnel couplé à un canal horizontal en plexiglas) est de donner plusieurs indications en même temps : (1) le temps

d'écoulement dans le V-Funnel ; (2) le temps de remplissage du canal horizontal ; et (3) la capacité de remplissage de béton tout en visualisant le profil d'écoulement.

En outre, l'approche la plus adoptée pour quantifier ces propriétés rhéologiques est de mesurer expérimentalement la contrainte de cisaillement par rapport au taux de contrainte de cisaillement en utilisant un rhéomètre béton. Dans ce travail nous avons trouvé d'autres corrélations entre les différentes mesures rhéologiques et d'ouvrabilité. Une corrélation parfaite entre deux grandeurs différentes par exemple, permet de faciliter la caractérisation d'un béton autoplaçant en n'en mesurant qu'une seule, et d'en déduire la seconde.

Nous sommes arrivés alors à proposer une corrélation entre la viscosité plastique du béton et le temps d'écoulement dans le V-Funnel et les caractéristiques rhéologiques du profil d'écoulement dans le canal horizontal. L'approche proposée a été vérifiée par des résultats expérimentaux. Nous disposons maintenant d'un outil expérimental permettant de caractériser de mieux en mieux l'écoulement du béton à partir de ses caractéristiques rhéologiques (ex. temps V-Funnel, longueur d'écoulement, etc.).

Sous la lumière des résultats des essais que nous avons réalisés selon notre procédure sur un ensemble de plus de 20 compositions différentes, les abaques proposés sont des moyens très simples qui permettent de déterminer d'une manière directe la viscosité plastique et le seuil d'écoulement des BAP. Les bétons dont les valeurs de seuils de cisaillement inférieurs à 35 Pa et des viscosités inférieures à 85 Pa.s satisfont aux conditions requises pour être qualifiés de béton autoplaçant.

De plus, nous nous sommes intéressés à la mesure directe du volume d'eau ressuée, puis de l'indice de ressuage «IR». L'appréciation visuelle de nos bétons (en matière de stabilité, de ressuage et de ségrégation) lors des différents essais, a permis de constater la bonne stabilité de tous les bétons dont la valeur au tamis était inférieure ou égale à 15%. Sous la lumière des résultats des essais que nous avons réalisés selon notre procédure sur un ensemble de 7 compositions différentes on peut conclure que l'essai proposé est un essai très simple qui permet l'appréciation directe du ressuage dans les bétons. Il ressort des résultats obtenus que la limite de l'IR pour obtenir un bon BAP est de l'ordre de 0,38%. Toutefois, il va falloir procéder à d'autres essais complémentaires en adoptant d'autres paramètres pour pouvoir conclure sur la limite de l'IR. C'est le but de l'auscultation sonore à l'état frais.

La ségrégation est une séparation des constituants du béton frais qui peut se produire chaque fois que celui-ci est transporté ou mis en place ou simplement sous l'effet gravitaire quand le béton est en repos. Dans ces cas l'essai proposé, auscultation sonique avec mode de transmission direct, peut être utilisé pour vérifier l'homogénéité du béton et contrôler sa qualité.

D'une manière générale, à partir des résultats des essais que nous avons réalisés on peut conclure que l'utilisation du canal vertical en plexiglas nous a permis d'apprécier à la fois : (1) le ressuage en utilisant le seringue ou la règle pour mesurer le volume d'eau ségrégée; (2) la ségrégation en utilisant l'auscultation sonique à l'état frais. Cet essai est très facile à réaliser en chantier et ne nécessite qu'un petit échantillon (12 litres) de béton.

☞ À l'état durci, notre travail a donc consisté, en premier lieu, à mettre en évidence, à partir d'essais expérimentaux, l'influence de fibres métalliques et synthétiques sur la fluidité, la stabilité et la résistance du béton. Puis, une vérification des propriétés mécaniques et des fissures développées a été effectuée dans le but de valider une formulation finale optimisée. Pour cela on a essayé d'améliorer les propriétés mécaniques du béton autoplaçant par l'ajout des fibres, sans modifier notablement ses performances rhéologiques, en partant de la formulation d'un BAP qui respecte tous les critères rhéologiques et mécaniques fixés par les normes, nous avons cherché à modifier la formulation en faisant varier le squelette granulaire par l'ajout des quatre types de fibres.

Nos résultats montrent alors que : (1) avec un dosage en fibres métalliques, le béton qui respecte les caractéristiques rhéologiques d'un BAP, la résistance en flexion n'est que peu influencée; (2) grâce à l'excellente capacité des fibres macro-synthétiques à se répartir dans la matrice cimentaire (nombre élevé de fibres par kg), la résistance en flexion est grandement améliorée; (3) l'utilisation d'une grande quantité des fibres micro-synthétiques augmente l'agglomération des fibres dans le béton frais ce qui perturbe les caractéristiques autoplaçantes; et (4) la caractéristique mécanique par la mesure du module d'Young est aussi importante car elle conditionne la rigidité des structures. En comparant un béton autoplaçant à des bétons autoplaçants fibrés, on note une augmentation du module avec la teneur en fibres.

Au cours de nos travaux, nous avons étudié l'évolution physico-chimique et mécanique des bétons BAP, BHP et BHPF. Pour le BAP, la prise étant plus lente grâce à l'ajout de filler calcaire et donc le dégagement de chaleur est également plus lent (au bout de 6 heures d'essai, la chaleur d'hydratation commence à augmenter). Par contre l'ajout de la fumée de silice dans le cas de BHP accélère les réactions d'hydratation grâce à son effet pouzzolanique (au bout de 2 heures d'essai, la chaleur d'hydratation commence à augmenter).

Perspectives

A l'issue de ce travail, il apparaît que plusieurs études complémentaires doivent être poursuivies, afin de valider totalement nos résultats, et de les prolonger vers un contrôle rationnel et global de la qualité du béton.

Certaines améliorations peuvent être apportées au dispositif d'essai (V-Funnel couplé à un canal horizontal en plexiglas). On suggère par exemple l'ajout des ferrailles dans le canal horizontal afin de s'affranchir d'éventuels problèmes de remplissage/blocage. De même, il peut être intéressant de compléter les essais en utilisant des produits transparents (Carbopol) pour visualiser l'orientation de fibres. Ceci permettrait de confirmer la validité des résultats obtenus au regard de l'influence de la capacité de remplissage. Résultats qui peuvent également nécessiter la prise en compte d'un état de surface et d'un coefficient de forme de canal utilisé. La modélisation numérique du coulage des bétons permettront une meilleure compréhension de leur rhéologie.

Ensuite, dans le travail présenté dans cette thèse, on s'est intéressé à la formulation, la caractérisation et aux propriétés des bétons sans agents de viscosité. En effet, des essais ont montré que le comportement des pâtes contenant un dosage en agent de viscosité élevé se différencie de celui des autres pâtes. L'étude de l'influence des agents de viscosité associée à celle de superplastifiant doit être poursuivie afin de comprendre les interactions entre ces deux adjuvants, le plus souvent utilisés simultanément. Il serait intéressant de pouvoir étudier l'applicabilité de la démarche de formulation proposée ainsi que la procédure expérimentale caractérisant la résistance à la ségrégation verticale aux bétons avec agent de viscosité. Il serait

aussi intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux (d'autres sources de granulats, de ciment, d'adjuvants...).

Enfin, la méthode de formulation que nous avons proposés, en utilisant les matériaux locaux, doit faire l'objet de confrontation à des expérimentations en vraie grandeur, dans lesquelles la ségrégation éventuelle serait observée.

REFERENCES

[1] Liu M. Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. *Constr Build Mater* 2010;24:1245–52.

[2] Leemann A, Loser R, Münch B. Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete. *Cem Concr Compos* 2010;32:116–20.

[3] Kou SC, Poon CS. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos* 2009;31:622–7.

[4] Filho FMA, Barragán BE, Casas JR. ALHC El Debs. Hardened properties of selfcompacting concrete – a statistical approach. *Constr Build Mater* 2010;24:1608–15.

[5] Boukendakdji O, Kenai S, Kadri EH, Rouis F. Effect of slag on the rheology of fresh self compacted concrete. *Constr Build Mater* 2009;23:2593–8.

[6] Craeye B, De Schutter G, Desmet B, Vantomme J, Heirman G, Vandewalle L, et al. Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. *Cem Concr Res* 2010;40:908–13.

[7] de LARRAD F., FERRARIS C.F. (1998), Rhéologie du béton frais remanié. I : plan expérimental et dépouillement des résultats, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 213, jan.-févr., pp. 73-89.

[8] FERRARIS C.F. (1996), Measurement of rheological properties of high-performance concrete: state-of-the-art report, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5869, July, 33 pages.

[9] TANIGAWA Y., MORI H., TSUTSUI K., KUROKAWA Y. (1986), Estimation of rheological constants of fresh concrete by slump test and flow test, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. 8, pp.65-72.

- [10] Ferraris, Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1999, vol 104, n°5, pp461-478.
- [11] EFNARC February 2002 "Specification and Guidelines For Self-Compacting Concrete".
- [12] AFGC. Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants. AFGC, Janvier 2008.
- [13] WALLEVIK O.H. and GJØRV, O.E. , " Modification of the two-point workability apparatus", Magazine of Concrete Research, No. 152, September, 1990, pp. 135-142.
- [14] Jin, Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis de l'Université de Londres, 2002, 398 pages.
- [15] Ferraris, de Larrard, Testing and modeling of fresh concrete technology, NIST, 1998, février, NISTIR 6094, 61 pages.
- [16] Baron J., 1982, « La nécessité d'une démarche pragmatique: idée de maniabilité et sa mise en pratique », (dans « Le béton hydraulique, connaissance et pratique »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [17] LESAGE R., "Etude expérimentale de la mise en place du béton frais", Thèse de Paris VI et Rapport de Recherche LPC 37, Juin 1974, 127 p.
- [18] DE LARRARD F., "Le comportement rhéologique des bétons", Séminaire ENPC "La mise en œuvre des bétons, Mai, 1993.
- [19] J. Assaad, K.H. Khayat, Formwork pressure of self-consolidating concrete made with various binder types and contents, ACI Materials Journal 102 (2) (2005) 215–223.
- [20] J. Assaad, K.H. Khayat, Effect of coarse aggregate characteristics on lateral pressure exerted by self-consolidating concrete, ACI Materials Journal 102 (3) (2005) 145–153.
- [21] A. Gregori, R. Ferron, Z. Sun, S.P. Shah, Experimental simulation of SCC formwork pressure, ACI Materials Journal 105 (1) (2008) 97–104.
- [22] T.K. Erdem, K.H. Khayat, A. Yahia, Correlating rheology of self-consolidating concrete to corresponding concrete-equivalent mortar, ACI Materials Journal 106 (2) (2009) 154–160.
- [23] J.Y. Petit, E. Wirquin, Y. Vanhove, K.H. Khayat, Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete, Cement and Concrete Research 37 (5) (2007) 655–670.

- [24] P. Billberg, Mechanisms behind reduced form pressure when casting with SCC, Proceedings of the First International Symposium on Design. RILEM PRO 42 Hunan. China, 2005, pp. 589–598.
- [25] Brandt, A.M. (1995): *Cement-Based Composites – Materials, Mechanical Properties and Performance*, Spon, London.
- [26] BAROGHEL BOUNY V., *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons –Méthodes, Analyse, interprétations*, Thèse de l'E.N.P.C., L.C.P.C., Paris, 1994, 468 p.
- [27] Abib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, le 06 Juillet 2006.
- [28] Gartner, E.M., Young, J.F., Damidot, D.A., and Jawed, I. (2002): *Hydration of portland cement*. Chapter 3 in *Structure and performance of cements* (eds. Bensted and Barnes) Spoon Press, London.
- [29] P. Billberg. Fine mortar rheology in mix design of scc. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [30] Gibbs J.C and ZHU W., “Strength of hardened self-compacting concrete”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre (1999).
- [31] Kara-Ali R., influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, Thèse de doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2002.
- [32] R. SERSALE, “Structure et caractérisation des pouzzolanes et des cendres volantes » thème VI- 17ème Congrès International de la chimie des ciments - Volume 1- Paris 1980.
- [33] H. PICHON, P. Gaudon, A. Benhassain, O. Eteradossi, «Caractérisation et quantification de la fraction réactive dans les pouzzolanes naturelles », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 201- Jan-Fev 1996.
- [34] Park, Noh, Park, *Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures*, Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp 842-849.
- [35] Ferraris, Olla et Hill, *Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete*, Cement and concrete research, 2001, vol 31, pp245-255.

[36] Shi and al., *A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste*, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, vol 20, pp 9-14.

[37] Carlsward et al., *Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting concrete*, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 143-153.

[38] Khelifa R., «L'impact des cimenteries sur l'environnement – Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.

[39] Seddik A. Thèse de magistère en Génie Civil, « Le béton autoplaçant sous conditions locales », Département de Génie Civil, Université de Sétif (Algérie), Février 2008.

[40] NF EN 12-620.

[41] Khélifa R., «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.

[42] Pierre JAVELLE, Paul PONTEVILLE « Laitier de haut fourneau : propriétés et emplois » Dossier technique de l'ingénieur, élaboration et recyclage des métaux.

[43] Liu M. Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. *Constr Build Mater* 2010;24:1245–52.

[44] Craeye B, De Schutter G, Desmet B, Vantomme J, Heirman G, Vandewalle L, et al. Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. *Cem Concr Res* 2010;40:908–13.

[45] Boukni bariza, Houari hacène 2009 « L'EFFET DE FILLERS SUR LES PERFORMANCES DES BETONS AUTOPLAÇANTS » Thèse de doctorat, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions Université Mentouri Constantine.

[46] Bury, Christensen, *The role of innovative chemical admixtures in producing selfconsolidating concrete*, Proceedings of the first North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 Novembre 2002, Chicago, pp 141-146.

[47] Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N., «Superplasticizers : Properties and Applications in Concrete», Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 1998.

- [48] Flatt R., J., Houst Y. F., «A simplified View on Chemical Effects perturbing the Action of Superplasticizers», *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, pp. 1169-1176.
- [49] Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D., «The Role of Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in fresh Paste prepared with Organic Admixtures», *Cement and Concrete Research*, vol. 27, 1997, pp. 37-50.
- [50] Spiratos, N., Pagé, M., Mailvaganam, N.P., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., «Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology, and Practice», Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 2003.
- [51] Khorami, J., Aïtcin, P.-C., «Physiochemical Characterization of Superplasticizers», *Proceedings of the 3rd International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, U.S.A., 1989, SP-119, pp. 117-131.
- [52] SHILSTONE, J.Sr., *Concrete mixtures and construction needs Concrete International : Design and Construction*, Vol. 11, No. 12, dec, 1989, pp.53-57.
- [53] A.G. Sarzalejo, B. Rossi, G. Perri, R. Winterberg et R.E. P. Artisteguieta: *Fibers as structural element for the reinforcement of concrete. Technical Manual Maccaferri.*
- [54] Rossi P., Casanova P., Renwez S., *Les bétons fibrés à hautes performances – Des matériaux d'avenir?*, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 197, pp 19-23, Paris, France, 1995.
- [55] Naaman A. E., *engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites*, *Journal of advanced concrete technology*, Japan Concrete Institute, Vol. 1, (3), 241-252, November (2003).
- [56] Bache, H.H. (1989): *Fracture mechanics in integrated design of new, ultra-strong materials and structures. In Fracture Mechanics of Concrete Structures – From theory to applications*, ed. L. Elfgren, Chapman and Hall, London 1989, pp. 382-398.
- [57] Li, V.C. (1995): *New Construction Materials Proliferate in Japan*, *Civil Engineering*, August 1995.
- [58] Walraven J. (1999): *The evolution of concrete. Structural Concrete – Journal of the fib*, No. 1, March, Thomas Telford, pp. 3-11.
- [59] Brandt, A.M. and Kucharska (1999): *Developments in Cement-Based Composites. In Extending the Performance of Concrete Structures*, eds. R.K. Dhir and P.A.J. Tittle,

Proceedings of the international seminar held at the University of Dundee, Scotland, UK, on Sept. 7 1999, Thomas Telford Publishing, pp. 17-32.

[60] Guse, U. and Müller, H.S (2000): Forschungsergebnisse und Ausblick ins neue Jahrtausend, *Betonwerk + Fertigteile-Technik*, BFT 1/2000, pp. 32-45. (In German)

[61] Guerrini, G.L. (2000): Applications of High-Performance Fibre-reinforced Cement-Based Composites, *Applied Composite Materials*, 7, Kluwer Academic Publisher, pp. 195-207.

[62] Zilch, K. (2000): Innovationen und Entwicklungen im Massivbau, *Bauingenieur*, Band 75, August 2000, pp. 537-546. (In German)

[63] Aïtcin, P-C. (2000): Cements of yesterday and today – Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 (2000), pp. 1349-1359

[64] Harryson, P. (2002): *Industrial bridge construction – merging developments of process, productivity and products with technical solutions*. Publication 02:1, Dept. Of Structural Engineering – Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2002, 90 pp.

[65] Bentur, A. (2002): Cementitious Materials – Nine Millennia and A New Century: Past, Present, and Future. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 1, February 1, 2002, pp. 2-22.

[66] Bennett, D. (2002): *Innovation in concrete*. Thomas Telford Publishing, London, 2002.

[67] Chong, K.P. and Garboczi, E.J. (2002): Smart and designer structural material systems, *Prog. Struct. Engng Mater.* 2002, No. 4, pp. 417-430.

[68] Malier Y. (1992 a) : Les Bétons à Hautes performances, caractérisation, durabilité, applications, École française du béton, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

[69] Féret (1892), *Compacité des mortiers hydrauliques*. Annales des Ponts et Chaussées série 7, vol. 4 : 5-164.

[70] J. YAMMINE, « Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques », 2007, thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 243 pages.

- [71]** AFGC - SETRA Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP) – Recommandations provisoires ; Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concretes. Interim Recommendations, UHPFRC task group of the French Association of Civil Engineering, Janvier 2002.
- [72]** Serna Ros P. (1984), Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement, Thèse de docteur ingénieur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [73]** Rossi P., Harrouche N., Belloc A. (1989a), Méthode de composition des bétons de fibres métalliques, Annales de l'ITBTP, n°475, série béton 266, pp. 38-43.
- [74]** Baron J., Lesage R. (1969), Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques. Rapport de Recherche LPC n°3.
- [75]** H. Okamura and M. Ouchi. Self-compacting concrete, development, present use and future. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [76]** H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. Self-compacting concrete. Structural Concrete, (1) :3_17, March 2000.
- [77]** Petersson O., Billberg P., "Investigation on blocking of self-compacting with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 333-344, 1999.
- [78]** Bui V.K., Montgomery D., "Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume", Proceedings of the first International RILM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 373-384, 1999.
- [79]** SU Nan, Kung-Chung HSU and His-Wen CHAI, A Simple mix Design Method for Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research 31 (2001), pp 1799-1807.
- [80]** Sedran T., de Larrard F., "Optimization of self compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 321-332, 1999.
- [81]** TURCRY Philippe, Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.

- [82]** M. HAYAKAWA , Y. MATSUOKA and K. YOKOTA, "Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.
- [83]** S. NAGATAKI and H. FUJIWARA, "Self compacting property of highly flowable concrete", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314, 1995.
- [84]** H. Okamura, K. Ozawa « Mix design for self compacting concrete », Concrete library of JSCE, N° 25, pp 107-120, 1995.
- [85]** H. Okamura, Self compacting High performance Concrete, Social System Institute, Concrete. Int. 19 (7) 50-54, 1999, Tokyo (in Japanese).
- [86]** Okamura H., Maekawa K., Ozawa K., "High performance concrete", First ed. Gihouda Publishing Co, Tokyo, 1993.
- [87]** Okamura H., Ozawa K., "Self-compactable high performance concrete", International Workshop on High Performance Concrete, American Concrete Institute, Detroit, pp. 31-44, 1994.
- [88]** Okamura H., Ouchi M., "Self-compacting high performance concrete", Progress in Structural Engineering and Materials 1, 14, 1998.
- [89]** Ozawa K., Maekawa K., Okamura H., "High performance concrete with high filling capacity", Proceedings of RILEM International Symposium on Admixtures for Concrete : Improvement of Properties, Barcelone, pp. 51-, 1990.
- [90]** M. Ouchi, Y. Edamatsu, « A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete », Transactions of the Japan Concrete Institute, vol 21, pp 1-6, 1999.
- [91]** RILEM, "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France, 2001.
- [92]** S. Bethmont : MECANISMES DE SEGREGATION DANS LESBETONS AUTOPLAÇANTS (BAP) - Etude expérimentale des interactions granulaires, thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées, (décembre 2005)

- [93] Jin, Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis de l'Université de Londres, 2002, 398 pages.
- [94] T. Sedran, « Rhéologie et rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants », 1999, thèse de l'école des ponts et chaussées, 220 pages. OA 34.
- [95] F. Jacobs and F. Hunkeler. Design of self-compacting concrete for durable concrete structure. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [96] Edamatsu Y., Nishida N., Ouchi M., "A rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self- Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 309-320, 1999.
- [97] P. Petersson, P. Billberg, and B. K. Van. A model for self-compacting concrete. In Proceedings of International RILEM Conference on Production methods and workability of concrete. RILEM, 1999.
- [98] S. Tangtermsirikul and B. K. Van. Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete. In Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering. SC-4, 19-20 décembre, 1995.
- [99] S.G. Oh, T. Nogushi, and F. Tomosawa. Toward mix design for rhéology of self-compacting concrete. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [100] G. Chanvillard and O. Basuyaux. Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, (205) :49-63, Septembre-Octobre 1996.
- [101] Ozawa, K., Tangtermsirikul, S., Maekawa, K. (1992): *Role of Powder Materials on the Filling Capacity of Fresh Concrete*, Proceedings of the 4th Canmet/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, pp. 121-130.
- [102] Billberg P., "Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience", Report 2:99 Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 80 p., 1999.

- [103]** Bui V.K., Akkaya Y., Shah S.P., "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, 99, 6, pp. 549-559, novembre-décembre 2002.
- [104]** F. de Larrard, « Structure granulaire et formulation des bétons », 2000. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA34, Paris.
- [105]** SEDRAN Thierry, François de LARRARD et Daniel ANGOT, Préviation de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194 - nov-déc, 1994, Réf. 3862.
- [106]** SEDRAN Thierry, François de LARRARD et Daniel ANGOT, Préviation de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. II. Validation. Cas des mélanges confinés, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194 - nov-déc, 1994, Réf, 3863.
- [107]** T.T. Roshavelov. Concrete mixture proportioning with optimal dry packing. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [108]** Turcry P., Loukili A., "Différentes approches pour la formulation des bétons autoplacants : incidence sur les caractéristiques rhéologiques", Forum des associations AFGC/AUGC/IREX : innovation et développement en génie civil et urbain - nouveaux bétons, Toulouse, 30-31 mai 2002.
- [109]** Bonzel J., Schmidt M. (1986), Distribution and orientation of steel fibres in concrete and their influence on the characteristics of steel fibre concrete, FRC-86, Development in Fiber Reinforced Cement and Concrete, RJLEM Symposium, Sheffield, vol. I.
- [110]** Debicki G. (1991), Modélisation structurelle du béton de fibres, GRECO Géomatériaux, rapport scientifique.
- [111]** Bernier G., Lecuir V. (1994), Structuration des BRF et réponse mécanique, Les Bétons Renforcés de Fibres Métalliques, Colloque Francophone, Buyle-Bodin F., Granju J.L., Pigeon M. (Eds), Béthune, France, pp. 57 - 67.
- [112]** Casanova P., Rossi P., Renwez S., Belloc A. (1995a), Fabrication de voussoirs en béton de fibres d'acier. Etude du matériau, Bulletin de Liaison des LPC, n° 196, mars - avril, pp. 97-99.
- [113]** Rossi P. (1991), Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques, Annales de l'ITBTP, n°492, série béton 279, mars-avril, pp. 90-107.

- [114]** A.C.I COMMITTEE 544- IR 82., " State of the art report on fiber reinforced concrete " Concrete international, 1982, Vol. 4, N°5, pp.9-30.
- [115]** DARDARE J., " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène ", In : fibre reinforced cement and concrete, RILEM Symposium,1975.
- [116]** Persoz, B. Introduction à l'étude de la rhéologie, Paris, Dunod, 1960
- [117]** Beaupré, D. Rheology of High Performance Shotcrete, Ph.D. Thesis, University of British Columbia, 1994
- [118]** Couarraze G. and Grossiord J.L. (1983) Initiation à la Rhéologie, Lavoisier, Paris.
- [119]** D. Quemada, Models for Rheological Behavior of Concentrated Disperse Media under Shear, Proc. IX Intl. Cong. on Rheology, Mexico 1984.
- [120]** Roscoe R. The viscosity of suspensions of rigid spheres. Br J Appl Phys (London) 1952;3:267–9.
- [121]** Murata J., Kikukawa H., Viscosity equation for fresh concrete, ACI Materails Journal, (1992).
- [122]** Ferraris CF, deLarrard F. Testing and modeling of fresh concrete rheology. Maryland: Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg; 1998.
- [123]** Krieger I.-M., Dougherty T.-J, cité in Krieger IM. Rheology of monodisperse latices, Advanced Colloidal Interface Science 3, pp. 11-136, 1972.
- [124]** Mooney M. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. J Colloids Sci 1951;6:162–70.
- [125]** Eiler H. (1943) Kolloid, Z., 102, p.154
- [126]** Chong J.S., Christiansen E.B. and Baer A.D. (1971) J. Appl. Polym. Sci., 15, p.369, 2007-2021.
- [127]** Roshavelov T. Prediction of fresh concrete flow behavior based on analytical model for mixture proportioning. Cem Concr Res 2005;35:831–5.

- [128]** Hu, C., Rhéologie des bétons fluides. 1995, Ecole Nationale des ponts et Chaussées: Paris. p. 201.
- [129]** Bingham E.C. and Green H. (1919) Paint, a Plastic Material and not a Viscous Fluid; Measurement its Mobility and Yield Value, Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 19 (II), pp.640-675.
- [130]** Herschel W.M. and Bulkley R. (1926) Measurement of Consistency as Applied Solutions, Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 26 (II), pp.621-634.
- [131]** Vom Berg W. (1979) Influence of Specific Surface and Concentration of Solids upon the Flow Behavior of Cement Pastes, Magazine of Concrete Research, 31 (109), pp.211-216.
- [132]** Ostwald- de Waele, G. H. Tattersall, The workability of concrete, A view point Publication, PCA 1976.
- [133]** Eyring H. (1936) Viscosity, Plasticity, and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates, J. Chem. Phys., 4, pp.283-291.
- [134]** Robertson R.E. and Stiff H.A. (1976) An Improved Mathematical Model for Relating Shear Stress to Shear Rate in Drilling Fluids and Cement Slurries, Journal of the Society of Petroleum Engineers (SPEJ), 16 (Part I), pp.31-36.
- [135]** C. Atzeni, L. Massida, and U. Sanna, New Rheological Model for Portland Cement Pastes, Il Cemento 80 (1983).
- [136]** Casson, W, "A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type", in "Rheology of disperse systems", (Editor: Mill, C C), Pergamon, London, (1959).
- [137]** De Kee D, Zhu H, Slotted-plate device to measure yield behavior of powders; FEM analysis. Ind Eng Chem Res 45:5375–5383
- [138]** Yahia, A and Khayat, K H, "Analytical models for estimating yield stress of high performance pseudoplastic grout", Cem. Concr. Res., 31 (2001), 731-738.
- [139]** Mohammed Rissel KHELIFA "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplçants" thèse en cotutelle internationale, école doctorale sciences et technologie, université d'Orleans 2009, 178 pages.
- [140]** NF P 18-353, Norme Française P 18-353 ; Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aide de l'aéromètre à béton.

- [141]** de Larrard, F., C. Ferraris, and T. Sedran, Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material, in *Materials and Structures*. 1998, Springer Netherlands. p. 494-498.
- [142]** Domone P.L.J., Xu Yongmo, Banfill P.F.G., "Developments of the Two-Point Workability Test for High-Performance Concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, pp. 181-190, 1999
- [143]** Chapdelaine. F, Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais, Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès Science (M.Sc), Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval (Canada), p.32, 1998.
- [144]** Wallevik O.H., Gjorv, O.E., "Development of a Coaxial Cylinder Viscometer for Fresh Concrete," *Properties of Fresh Concrete*, proceedings of the Rilem Colloquium, Chapman & Hall, Hanover, October, 1990, pp. 213-224
- [145]** BTRHEOM de Larrard, F., Szitkar J.-C., Hu, C., Joly M., "Design of a Rheometer for Fluid Concretes," *RILEM Workshop Special Concretes – Workability and Mixing*, 201- 208, 1993.
- [146]** Ferraris, C.F., and Brower, L.E. (Eds.). (2001). *Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000*, (NISTIR 6819). Gaithersburg, MD. National Institute of Standards and Technology.
- [147]** Chiara F. Ferraris, Lynn E. Brower. *Comparison of concrete rheometers: International tests at MB (Cleveland OH, USA) in May 2003*, (NISTIR 7154). National Institute of Standards and Technology.
- [148]** Roussel N., Coussot P., « Ecoulements d'affaissement et d'étalement : modélisation, analyse et limites pratiques », *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, n° 1, 2006, pp. 25-44.
- [149]** Wallevik, *Rheology-A scientific approach to develop self-compacting concrete*, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 23-31.
- [150]** Banfill P.F.G. : *The rheology of fresh cement and concrete - a review*, In 11th International Cement Chemistry Congress, 2003.
- [151]** Kaplan, D. (2000) *Pompage des bétons*, Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 225 p.

- [152]** Chapdelaine, F. (2006). Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton. Département de génie civil, Université Laval, Canada. Thèse, 200 pages.
- [153]** O.H. Wallevik, Practical description of rheology of SCC, SF Day at the Our World of Concrete, Singapore, August, 2002.
- [154]** Domone, P. and J. Jin. Properties of mortar for self-compacting concrete. In First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. 1999. Stockholm, Sweden: RILEM Publications SARL.
- [155]** Utsi, S., M. Emborg, and J. Carlswald. Relation between workability and rheological parameters. in International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Août 2003. Reykjavik, Islande: RILEM Publications SARL, pp 154-164.
- [156]** Emborg, "Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production", Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp95-105.
- [157]** Grünewald S., Walraven J.C., "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58, 2003.
- [158]** Nielsson I., Wallevick O.H., "Rheological evaluation of some empirical test methods – preliminary results", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 59-68, 2003.
- [159]** Mouret M., Sbartai M., Picot J., "Caractérisation des grandeurs rhéologiques et d'ouvrabilité : recherche de corrélation multi-échelle", rapport de recherche, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Toulouse, 35 p., 2004.
- [160]** Kurokawa, et al., A Study on the Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1994. 16(1): p. 25-32.
- [161]** Coussot, P., S. Proust, and C. Ancey, Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1996. 66(1): p. 55- 70.
- [162]** Esping, O., Early age properties of self-compacting concrete, Effects of fine aggregate and limestone filler, in Department of Civil and Environmental Engineering Building Technology. 2007, Chalmers University: Goteborg, Sweden. p. 206.
- [163]** Hu C., de Larrard F., "The rheology of fresh high performance concrete", Cem. and Conc. Res., vol. 26, 1996, pp. 283-294.

- [164]** Billberg P. 2001, influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration, Proceedings of 2nd Inter Conf on SCC, Tokyo, Japon, pp. 285-294 et 23-25.
- [165]** Behim M. 2004, Sous produits industriels et développement durable : Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'EL HADJAR dans les matériaux à matrice cimentaire, *Thèse de doctorat d'état en cotutelle Université d'Annaba – INSA de Toulouse*, pp 187.
- [166]** Glavind, M. (1992): Evaluation of the Compressive Behaviour of Fibre Reinforced High Strength Concrete. PhD. thesis, Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering, Serie R No. 302, 144 pp.
- [167]** Malhotra, V.M. and Sivasundaram, V., (2004). Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. 2nd Edition. CRC Press, editors, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 7-11.
- [168]** Laplante P., Roussel S., Lecrux S. (1998) "Technique maturométrique: la loi d'Arrhénius au service des chantiers" Proceedings of the International RILEM Conference, RILEM Publications, Arles, France (1998), pp. 323–342.
- [169]** Schlinder A.K. (2004) "Prediction of concrete setting" Proceedings of International RILEM Conference on Advances in Concrete through Science and Engineering, Evanston, Illinois.
- [170]** Zhang J., Cusson D., Mitchell L., Hoogeveen T., Margeson J. (2005) "The maturity approach for predicting different properties of high-performance concrete." Proceedings of the 7th International Symposium on the Utilization of high strength/ high-performance concrete, Washington DC, p. 135-154.
- [171]** Carino N.J., Lew H.S. (2001), "The maturity method: from theory to application" Proceedings of the structures congress and Exposition, May 21-23, Washington, 19 p.
- [172]** Barnett S.J., Soutsos M.N., Millard S.G., Bungey J.H. (2006), "Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies" Cement and Concrete Research Vol. 36, pp. 434-440.
- [173]** Kamen A., Denarié E., Sadouki H., Brühwiler E. (2008), "UHPFRC tensile creep at early age". Materials and Structures, en presse.
- [174]** Viviani M, Glisic B., Smith F.C. (2005) "Three-day prediction of concrete compressive strength evolution" ACI Materials Journal, Vol. 102, pp.231-236

[175] Carino J. N., Molhotra V.M., Maturity method, CRC Handbook on non-destructive testing of concrete, Molhotra V.M. and Carino J. N. EDS CRC press, pp 101-146, 1991.

[176] ARNAUD PERTUÉ," Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges", 2008, thèse de doctorat de l'université de Nantes, 241 p.

[177] V.M. Malhotra and N.J. Carino, editors. Handbook on non destructive testing of concrete. CRC Press LLC, 1991.

[178] Naik, T.R., Malhotra, V.M., (1991). Chapter 7: The Ultrasonic Pulse Velocity Method. CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, éditeur, V.M. Malhotra, N.J. Carino, pp. 169-188.

[179] Mathieu CHEKROUN, " Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface" , 2008, thèse de doctorat de l'école centrale de Nantes, 187 p

[180] RILEM, Tests on the concrete by the method of the ultrasonic testing: recommendation of RILEM, Annals of the Technical Institute of the Building and PublicWorks, Series: Test and Measurements, No. 142, 1973.

[181] ASTM C 597 (1998). Standard test method for pulse velocity through concrete. ASTM. USA.

[182] British Standards Institution BS EN 12504-4, Testing Concrete. Part 4. Determination of Ultrasonic Pulse Velocity, London, 2004.

[183] Djezzar M., Ezziane K., Kadri A., Evaluation pratique de la compatibilité ciment superplastifiant dans les BHP, Colloque Maghrébin en Génie Civil, Biskra 16-17 Nov, 1998, pp.263-272.

[184] Raymond Dupain et al., « Granulats, Sols, Ciments Et Bétons » - Caractérisation Des Matériaux De Génie Civil Par Les Essais De Laboratoire, livre, 235 pages, 1995

[185] Roussel N. "The LCPC box: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC", accepted for publication in RILEM Mater. and Struct., 2007.

[186] M.BENAICHA, O.JALBAUD, A.ALAOUI HAFIDI and Y.BURTSHELL, "Correlation between viscosity and v-funnel flow time" Volume 3, Issue 1, Jan. 2013, pp 103-108.

- [187]** Huppert, H.E., 'The propagation of two-dimensional and axisymmetric viscous gravity currents over a rigid horizontal surface', *J. Fluid Mech.* 121 (1982) 43–58.
- [188]** Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., *Transport Phenomena*, Wiley, New York, 1960.
- [189]** VITTORIO DI FEDERICO, STEFANO MALAVASI and STEFANO CINTOLI, "Viscous Spreading of Non-Newtonian Gravity Currents on a Plane" *Meccanica* (2006) 41:207–217
- [190]** PATTLER, R. E. (1959), "Diffusion from an instantaneous point source with a concentration-dependent coefficient", *Q. J. Mech. Appl. Math.* 12, 407-409.
- [191]** Saak AW, Jennings HM, Shah SP. Characterization of the rheological properties of cement paste for use in self-compacting concrete. In: Skarendahl A, Petersson O, editors. *Proc. of the first int. RILEM symposium on 'selfcompacting concrete'*. Stockholm, Sweden; 1999. p. 83–93.
- [192]** Saak AW, Jennings HM, Shah SP. New methodology for designing selfcompacting concrete. *ACI Mater J* 2001;98(6):429–39.
- [193]** SHINDOH Takefumi and Yaasunori MATSUOKA, Development of Combination-Type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 1, 26-36, April 2003.
- [194]** Bousquet. J Poux.M; Fayolle. P ; Bertrand. J ; Bridoux.D. Powder mixing : some practical rules applied to agitated systems. *Powder Technology*, 68 (3) :213–234, 1991.
- [195]** CLEAR C.A. , BONNER D.G. : « Settlement of fresh concrete - an effective stress model. », *magazine of concrete research* , march 1988 vol. 40 n°142 pp 3-12.
- [196]** POWER T.C. : « The properties of fresh concrete. », J. Wiley & Sons, Inc. pp 533-652. New York, U.S.A.
- [197]** KHAYAT K.H. , GUIZANI Z. : « Use of viscosity modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. », *A.C.I. Materials journal* , jul. 1997 , N°94-4 pp 332-340.
- [198]** American Society for Testing and Materials : « Standard Test Methods for Bleeding of Concrete. », *ASTM C 232 - 87* pp144-147
- [199]** SENEBI Mohammed, Medium Strength Self-Compacting Concrete Containing Fly-ash: modelling using factorial experimental plans, *Cement and Concrete Research*, (2004).

- [200]** BUI V.K., D. MONTGOMERY, I. HINCZAK and K. TURNER, Rapid Testing Method for Segregation Resistance of Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research* 32 (2002), pp 1489 – 1496.
- [201]** G. Ovarlez, N. Roussel, A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork, *Materials and Structures* 39 (2) (2006) 269–279.
- [202]** J.C. Tchamba, S. Amziane, G. Ovarlez, N. Roussel, Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: laboratory experiments, *Cement and Concrete Research* 38 (4) (2008) 459–466.
- [203]** Seung Hee Kwon, Quoc Tri Phung, Hong Yong Park, Jae Hong Kim, Surendra P. Shah, “Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete” *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 90–101.
- [204]** Chanvillard G. (1993) Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d’acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d’art, OA12.
- [205]** Dupont, D., and Vandewalle, L. (2005): Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, pp. 391-398.
- [206]** K. ABDOU et H. HOUARI (2007) : Influence des fibres d’acier sur les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires. *Sciences & Technologie B – N°26*, décembre (2007), 43-48.
- [207]** Whitehurst, E., *J. Am. Concr. Inst.*, Vol. 47, 1951, pp. 433–444.
- [208]** S. Popovics, Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship, American Society for Nondestructive Testing, 2007.
- [209]** P. Turgut, Evaluation of the Ultrasonic Pulse Velocity Data Coming on the Field, 4th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, London, 2004.
- [210]** Waller V. (1999) « Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression» Thèse de doctorat de l’ENPC, Paris, 297 pages.
- [211]** Verbeck G.J., Helmuth R.H., (1968) “Structures and physical properties of cement past” *Proceedings of the 5th International Symposium of the Chemistry of Cement*, Tokyo (Japon) Vol. 1, p. 1-32.

- [212]** Kjellsen K.O., Detwiler R.J., GjØrv O.E. (1991), "Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures" *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, pp. 179-189.
- [213]** Eren Ö., (2002), "Strength development of concretes with ordinary Portland cement, slag or fly ash cured at different temperatures" *Materials and Structures* Vol. 35, pp. 536-540.
- [214]** Ho D.W.S., Chua C.W., Tam C.T., (2003), "Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures" *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 595-601.
- [215]** I. H. Nash't, S. H. A'bour, A. A. Sadoon, Finding an Unified Relationship between Crushing Strength of Concrete and Non-destructive Tests, Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition, Bahrain, 2005.
- [216]** G. F. Kheder, A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing, *Materials and Structures* 32 (1999) 410-417.
- [217]** Qasrawi HY (2000). Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliable predicted. *Cement and Concrete Res.* 30: 739-746.

ANNEXES

ANNEXE 1 :

Valeurs limites vis-à-vis de la durabilité (P 18-325-1 à l'EN 206-1)

Valeurs limites applicables en France pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition																		
	Classes d'exposition																	
	Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures						Attaque gel / dégel				Environnements chimiquement agressifs		
						Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer									
						X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1							
Rapport E_{eff}/f_{ctm} éq maximal	—	0,65					0,55	0,50		0,55	0,50	0,60	0,55	0,55	0,45	0,55	0,50	0,45
Classe de résistance minimale	—	C20/25					C30/37	C35/45		C30/37	C35/45	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50
Teneur mini en liant éq (kg/m ³)	150	260					330	350		330	350	280	300	315	340	330	350	385
Teneur minimale en air (%)	—	—					—	—		—	—	—	4	4	4	—	—	—
Rapport maximal A/(A+C)	Cendres volantes	0,30	0,30				0,15	0,15		0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,15 ^d	0,30 ^k	0,30 ^k	0,00
	Fumées de silice	0,10	0,10				0,10	0,10		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Laitier moulu	0,30	0,30				0,15	0,15		0,15	0,15	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30 ^k	0,30 ^k	0,00
	Addition calcaire	0,25	0,25				0,05	0,05		0,05	0,05	0,25	0,25	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00
	Addition siliceuse	0,20	0,20				0,15	0,15		0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00
	Nature du ciment	—	—				PM	PM		—	—	—	—	—	—	—	—	—