

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ecole Nationale Supérieure
des Travaux Publics
المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Mémoire

*Pour l'Obtention du Diplôme
de MASTER en TRAVAUX PUBLICS
Option : Matériaux & Structures*

Thème

Les bétons Autoplaçants (BAP)
«self-compacting concrete (SCC)»

Encadré par :

Dr GUETTACHE Brahim

Présenté par :

YOUSFI Yanis

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Table de matière

Table de matière	1
Liste des figures	3
Liste des tableaux	5
Résumé	6
Introduction général	7
Chapitre I : Historique des Bétons Autoplaçants.	
1. Introduction	10
2. Définition d'un béton autoplaçant	10
3. Les diverses appellations	10
4. Histoire des BAP	10
5. Conclusion.....	12
Chapitre II : Composition des BAP.	
1. Introduction	14
2. Les principaux constituants des BAP	14
2.1 Matériaux de base	14
2.2 Additions minérales	15
2.3 Adjuvants chimiques	15
3. Les critères de composition des BAP	15
3.1 Un volume de pâte important	15
3.2 Quantité élevée de fines (particules < 125 µm)	16
3.3 Utilisation d'adjuvants (superplastifiants)	16
3.4 Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion	17
3.5 Faible volume de gravillons	18
4. Formulations des BAP existants dans la bibliographie	19
4.1 Approche japonais	19
4.2 Méthode Français	20
4.3 Méthode Suédoise par PETERSSON et al. (1996)	23
4.4 Approche JSCE (Japanese society of civil engineers)	24
4.5 Approche basée sur un plan d'expérience	25
4.6 Autres Méthodes	25
5. Discussion et comparaison entre quelque formulations	25
6. Formulation d'un BAP avec les matériaux locale en Algérie	26
6.1 Caractéristique a l'état frais	27
6.2 Résistance en compression	27
7. Conclusion	28

Chapitre III : Caractéristiques Rhéologique des BAP à l'état frais.

1.	Introduction	30
2.	Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP	30
3.	Caractérisation d'un béton auto-plaçant a l'état frais	34
3.1	Classification des BAP	34
3.2	Cahier des charges minimum à l'état frais	34
3.3	Propriétés des BAP à l'état frais	35
3.4	Essais de caractérisation sur bétons autoplaçants	37
4.	Corrélation entre grandeurs spécifiques expérimentales et caractéristiques rhéologiques des BAP	43
5.	Conclusion	46

Chapitre IV : Caractéristique mécanique des Bétons Autoplaçants a l'état durci

1.	Introduction	48
2.	Les caractéristiques mécaniques instantanées	48
2.1	Résistance à la compression	48
2.2	Résistance à la traction	49
2.3	Module d'élasticité (en compression)	50
3.	Comportement mécanique différé	53
3.1	Retrait (état frais, état durci)	53
3.2	Déformations sous charge (fluage)	57
4.	Conclusion	58

Chapitre V : Domain d'utilisation et avantage des Béton Autoplaçants

1.	Introduction	60
2.	Domain d'utilisation des BAP	60
2.1	Application dans le Génie civil et Bâtiment	60
2.2	Application des BAP dans l'industrie de préfabrication	61
2.3	Utilisation des bétons autoplaçants dans la réparation	62
3.	Avantage des BAP	64
3.1	Impact socio-économique	64
3.2	Mise en œuvre	65
3.3	Aspect esthétique des BAP et réalisation des parements	67
4.	Conclusion	67
	Conclusion général	68
	Bibliographie	70

Liste des figures

Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo [4]	11
Figure I.2 : La tour Landmark Tower [4]	12
Figure II.1 : Dispersion des granulats par excès de pâte [9]	16
Figure II.2: Effet du superplastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion [10]	17
Figure II.3 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant [11]	17
Figure II.4 : Comparaison entre la composition type d'un béton ordinaire vibré (BO) et celle d'un béton autoplaçant (BAP) [15]	18
Figure II.5 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers [1]	19
Figure II.6 : Représentation de l'effet de paroi Tiré de [25]	22
Figure II.7 : Courbes pour détermination du volume minimal de pâte. La courbe en gras détermine la quantité de pâte minimale pour remplir la porosité entre les granulats. La courbe en pointillés détermine le volume de pâte minimal pour éviter le blocage. (Tiré de [25])	23
Figure II.8 : Comparaison de la résistance mécanique à la compression des différent BAP	28
Figure III.1 : Rhéomètre BML à cylindres coaxiaux [39]	31
Figure III.2 : Rhéomètre plan-plan BTRhéom [39]	31
Figure III.3 : Rhéomètre à cylindres coaxiaux Cemagref-IMG (volume de l'échantillon de 500 L ; ce rhéomètre était initialement dédié à l'étude des laves torrentielles) [39]	31
Figure III.4 : Interprétation physique du modèle de Bingham [42]	32
Figure III.5 : Modèle du comportement rhéologique d'un béton autoplaçants [43]	33
Figure III.6: Phénomène de blocage des granulats au droit des armatures [46]	35
Figure III.7 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [52]	36
Figure III.8 : Essai d'étalement au cône d'Abrams [41]	38
Figure III.9 : Principe de la mesure de l'étalement [41]	38
Figure III.10 : Appareil et dimensions de la boîte en L (L-BOX)	39
Figure III.11 : Remplissage du béton dans la partie verticale de L-BOX et Ecoulement du béton après l'ouverture de la trappe [41]	39
Figure III.12 : Mesure du taux de remplissage [41]	40
Figure III.13 : Essai de J-RING [41]	40
Figure III.14 : Mesure d'étalement en milieu confiné [41]	41
Figure III.15 : Essai d'entonnoir utilisé Pour mesurer le temps d'écoulement du béton [41]	41
Figure III.16 : Essai de stabilité au tamis	42
Figure III.18 : Corrélation entre la viscosité et la mesure du temps d'écoulement au V-funnel [60]	44
Figure III.19 : Corrélation entre le slump flow et le seuil de cisaillement [126]	45
Figure IV.1 : Evaluation de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [79] ...	48
Figure IV.2 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différent) [81]	49
Figure IV.3 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [101]	51

Figure IV.4 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [87]	51
Figure IV.5 : Ecart relatif du module des BAP ($g = 62\%$, $E_g = 75 \text{ GPa}$) par rapport aux prévisions du BAEL ..	52
Figure IV.6: Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure ($T = 20^\circ\text{C}$, 50% HR) [106]	53
Figure IV.7 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés [107]	54
Figure IV.8 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [108]	54
Figure IV.9 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [101]	55
Figure IV.10 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [109]	55
Figure IV.11 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [112]	56
Figure IV.12 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [111]	56
Figure IV.13 : Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [110] ..	57
Figure IV.14 : Déformation sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 Mpa [114]	57
Figure IV.15 : Coefficients de fluage à 180 jours en fonction de la résistance mécanique [117]	58
Figure V.1 : Élément de structure fortement armés ou l'utilisation des BAP est constitué la solution idéale ...	60
Figure V.2 : Ouvrage d'art [119]	61
Figure V.3 : Voile d'un Bâtiment [119]	61
Figure V.4 : voiles courbes [119]	61
Figure V.5 : Application du BAP a la préfabrication (a) (rapporté par [46])	62
Figure V.6 : Application du BAP a la préfabrication (b) (rapporté par [46])	62
Figure V.7 : Mis en place du béton autoplaçant [121]	63
Figure V.8 : Aspect final des réparations [121]	63
Figure V.9 : Coffrage [123]	64
Figure V.10 : Aspect finale des réparations [123]	64
Figure V.11 : A la benne à manchette traditionnelle	66
Figure V.12 : A la pompe avec injection en pied de coffrage	66
Figure V.13 : A la pompe en tête de coffrage avec tube plongeur	66
Figure V.14 : Esthétique d'un Bâtiment réalisé avec un BAP « Centre culturel de Meudon [124]	67

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Exemples de formulations japonaises [20]	20
Tableau II.2 : Exemples de formulation française Sedran [24]	23
Tableau II.3 : Composition (en Kg) des trois BAP pour 1 m ³ de béton frais [33]	26
Tableau II.4 : Caractéristique des BAP utilisés [33]	27
Tableau II.5 : Résultats des essais de caractérisation à l'état frais [33]	27
Tableau III.1 : Modèles rhéologiques [34]	30
Tableau III.2 : Paramétré rhéologique du béton BAP et BV [39]	33
Tableau III.3 : Classification des BAP [32]	34
Tableau III.4 : Spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais	43
Tableau IV.1 : Résistance à 28 jours pour des éléments standards d'après Gibbs et al [79]	50
Tableau IV.2 : Principales caractéristique des bétons testés par Paultre et al [104]	52

Résumé

Un béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

L'utilisation des Bétons autoplaçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques à l'état durci et rhéologique à l'état frais. Les spécificités de formulation de ces bétons (volume de pâte important, dosage élevé en additions minérales, rapport G/S (Gravillons/Sable) proche de 1, . . .) liées à leurs exigences de mise en œuvre pourraient modifier leur comportement mécanique à l'état durci et rhéologique à l'état frais, comparativement aux bétons traditionnels vibrés.

Ce travail consiste à rapporter les divers résultats d'études trouvés dans la littérature sur l'influence des spécificités de formulation sur les propriétés mécaniques à l'état durci et rhéologique à l'état frais, ainsi que les avantages résultant.

Mots-clés : Béton autoplaçant, Propriétés mécaniques, Propriétés rhéologique, Formulation des BAP.

Abstract:

Self-consolidating concrete is characterized by flowability, high deformability, homogenous and stability concrete which placed under gravity without using the means of vibration. It absolutely takes the most complex shapes formwork, it must be resistant segregation and also presented the same qualities as ordinary vibration concrete.

The using of self-consolidating concrete (SCC) has greatly developed during the last years and great care has devoted to study its mechanical properties in state of hardness and rheological fresh summer, these concretes are specificities formulations (important crease of paste, high dosage of mineral admixture, report (chippings/sand ration close to 1.....) related to their implementation which could modify their mechanical behavior in state of rheological fresh summer, compared to traditional vibration concretes.

This work is reported the various results of studies the influence of specificities formulation on mechanical properties in state of hardness and rheological fresh summer including resulting benefit

KeyWords : Self-compacting concrete, Mechanical Properties, rheological properties, formulation SCC.

Introduction général

Introduction général

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d'années, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Les essais, mis au point pour caractériser le matériau à l'état frais, concernent deux propriétés essentielles et indissociables des BAP : la fluidité et l'homogénéité. Apparaissant comme antagonistes, elles sont toutes deux nécessaires pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique appréciable, mais également conforme aux exigences techniques préconisées.

Chapitre I : Historique des Bétons Autoplaçants

1. Introduction

Le béton, matériau par excellence plus que centenaire, subit des incessantes évolutions tant dans l'amélioration de ses performances intrinsèques que dans ses utilisations en association avec d'autres matériaux qui lui confèrent d'autres propriétés. L'évolution de ce matériau a résulté plusieurs types de béton (béton a haut performance, béton autoplaçants...).

2. Définition d'un béton autoplaçant

Le béton autoplaçant se distingue principalement du béton ordinaire par ses propriétés à l'état frais. En effet, le béton autoplaçant est un béton fluide et parfaitement homogène qui se met en place sans vibration. Il est capable de s'écouler sous son propre poids quel que soit le confinement du milieu et reste homogène au cours de l'écoulement et une fois mis en place (absence de ségrégation dynamique et statique).

Grâce à son homogénéité, sa résistance à la ségrégation et sa stabilité, ce béton garantit des structures résistantes et durables.

De nombreux termes définissent ces bétons :

- Béton auto-compactant (BAC) ;
- Self-compacting concrete (SCC, en Anglais) ;
- Béton hyperfluide ;
- Béton autonivellant.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP).

3. Les diverses appellations

L'habitude a été prise de décliner les bétons autoplaçants en deux familles d'applications. La première emploie le terme "béton autoplaçant" pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, etc...). La seconde prend l'appellation "béton autonivellant", pour désigner les bétons destinés aux applications horizontales (dalles).

Chaque famille de béton autoplaçant est formulée suivant un même principe mais possède néanmoins certaines particularités. La formulation des bétons auto-nivellants comporte à priori moins de contraintes que celle des bétons autoplaçants. Dans leur cas, seul l'essai d'étalement est couramment effectué. L'essai à la boîte en L n'a pas de réelle utilité, puisque les dalles sont des milieux peu confinés. Il est à noter que les bétons autonivellant doivent être peu visqueux pour avoir une grande capacité d'auto-nivellement, [1].

4. Histoire des BAP

L'idée des BAP a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre. Puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels Japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure.

Les chercheurs et les industriels Japonais n'ont pas tout de suite publié leurs recherches. La viabilité des bétons autoplaçants devait être prouvée. Plusieurs équipes de recherche et de développement s'y sont consacrées. Des réalisations en vraie grandeur ont confirmé le travail mené au Japon depuis plus de dix ans.

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1999, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océanopolis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraillées.

À titre d'exemple nous citerons quelques réalisations japonaises

- Le pont Akashi Kaikyo (Figure I.1), le plus long pont suspendu au monde (3910m, 1991m entre les deux pylônes) où 770 000m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMURA et coll. 1994); [2]



Figure I.1 : Le pont Akashi Kaikyo [4]

- La tour Landmark Tower (Figure I.2), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll.1995) [3]



Figure I.2 : La tour Landmark Tower [4]

5. Conclusion

La complexité architecturale des ouvrages d'art ne cesse d'augmenter, avec le temps l'utilisation des BAP deviendra une nécessité afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques et esthétiques voulues.

Chapitre II : Composition des BAP

1. Introduction

Depuis son apparition, le béton autoplaçant a fait l'objet de plusieurs recherches. Des chercheurs du monde entier sont penchés sur le problème de formulation des bétons autoplaçants, et plusieurs méthodes ont été développées afin d'obtenir des bétons autoplaçants.

2. Les principaux constituants des BAP

Les constituants entrant dans la fabrication du BAP, peuvent-être classés selon leur utilisation, en trois catégories : les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques.

2.1 Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons de nos ancêtres et parce qu'ils constituent toujours les plus importantes proportions relatives dans le mélange des BAP.

a) Le ciment

En principe, tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de béton autoplaçant. Cependant, le ciment le plus employé pour la confection d'un BAP est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts [5].

b) Les granulats

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des coffrages, la quantité de granulats est donc limitée. En général le rapport granulats/sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D_{max} augmente [6]. Ainsi, le D_{max} des granulats doit être compris entre 10 et 20mm.

c) L'eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [7] :

- 2g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants [8].

2.2 Additions minérales

Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite,...), des fillers siliceux, des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des fumées de silice, des déchets de brique. Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Ils augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP. Les cendres volantes ou les laitiers permettent d'obtenir un maintien d'ouvrabilité le plus long. La fumée de silice conduit à une augmentation de la compacité d'un BAP donc des résistances mécaniques plus élevées. Les déchets de brique qu'on utilisera comme un ajout constituera une poudre à réactivité pouzzolanique et son incorporation au béton pourrait donner des caractéristiques mécaniques très intéressantes.

2.3 Adjuvants chimiques

Afin d'obtenir une très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant, on utilise généralement des adjuvants fluidifiant à base de polycarboxylates. Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés.

De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C. Dans chaque cas, il convient de sélectionner les adjuvants les mieux appropriés à un ciment donné au moyen d'essais préliminaires.

3. Les critères de composition des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

Les approches de composition des BAP sont basées sur les critères suivants

3.1 Un volume de pâte important

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des coffrages. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats les uns des autres. Son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³).

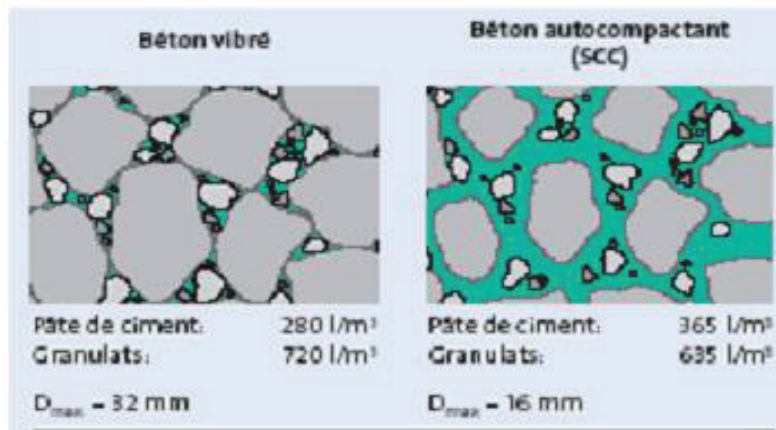


Figure II.1 : Dispersion des granulats par excès de pâte [9]

3.2 Quantité élevée de fines (particules < 125 µm)

Pour leur assurer une maniabilité suffisante, tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé de deux, voire trois constituants: ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité telles qu'imposées par les normes actuellement en usage (DTU 21, norme NF EN 206-1)

3.3 Utilisation d'adjuvants (superplastifiants)

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylates, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

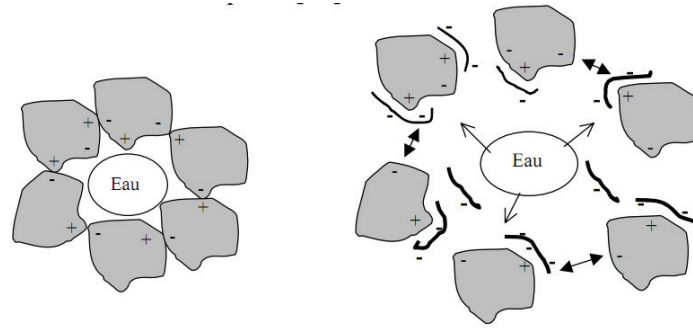


Figure II.2: Effet du superplastifiant sur les grains de ciment par le phénomène de dispersion [10]

La Figure II.3 illustre l'effet d'introduction d'un superplastifiant sur l'ouvrabilité du béton : plus le dosage en superplastifiant est grand plus le béton devient fluide jusqu'à une certaine valeur où l'augmentation du dosage en superplastifiant n'a plus d'effets sur l'étalement. De la même manière, la viscosité du BAP change faiblement jusqu'à un dosage à partir duquel elle commence à baisser d'une manière significative.

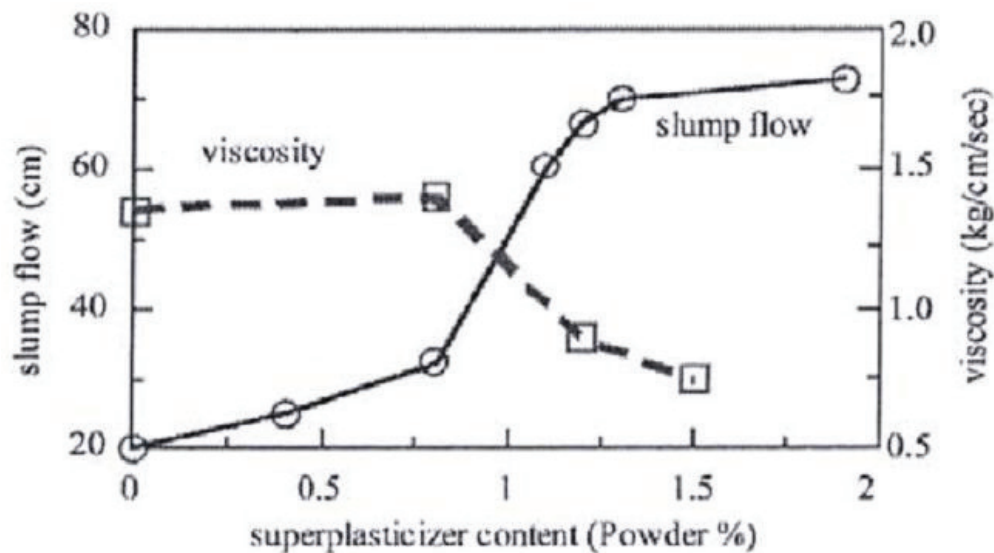


Figure II.3 : Etalement et viscosité en fonction du dosage en superplastifiant [11]

3.4 Utilisation éventuelle d'un agent de cohésion

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplacants aux variations de teneur en eau, [12].

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité. Il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif.

Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [13].

3.5 Faible volume de gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume.

D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées.

En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Bien évidemment, ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé, par exemple), ou à la baisse dans le cas contraire.

En général, le diamètre maximal D_{max} des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Les risques de blocage, pour un confinement donné, augmentent lorsque D_{max} augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon. Le choix d'un D_{max} plus important est donc possible, mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires. [14]

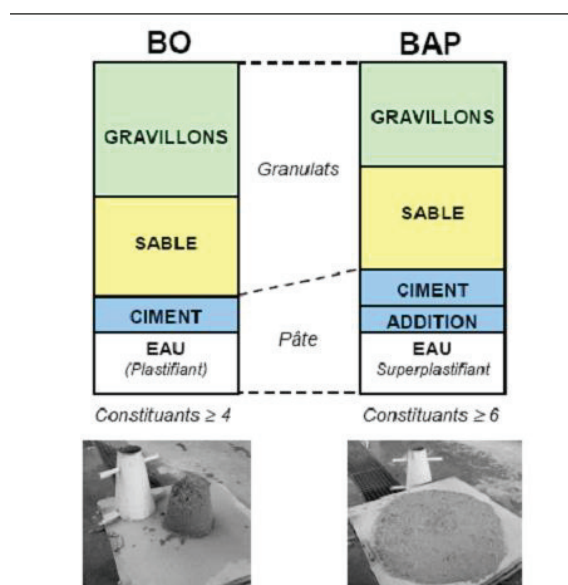


Figure II.4 : Comparaison entre la composition type d'un béton ordinaire vibré (BO) et celle d'un béton autoplaçant (BAP) [15].

4. Formulations des BAP existants dans la bibliographie

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences techniques de ce type de béton. On citera donc quelques formulations rapportées dans la littérature.

4.1 Approche japonaise

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs japonais Okamura, Ozawa et al. Elle permet l'obtention des formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, surdosés en liant et économiquement peu rentables.

La méthode repose sur les concepts suivants [16] :

- Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume des grains, le volume total du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage ;
- Volume de sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume total de mortier ;
- le rapport volumique eau/ciment, compris entre 0,9 à 1,0 selon le type de ciment ; le rapport massique correspondant est très faible compris entre 0,29 et 0,32 ;
- les quantités de superplastifiant et d'eau finale, ajustées de manière à assurer l'ouvrabilité du BAP.

Le dosage optimal en superplastifiant peut toutefois être approché par un travail d'estimation à partir d'essais réalisées sur le mortier (ciment+sable+eau+adjuvant). Les essais réalisés sur mortier sont : l'essai d'étalement au cône à mortier et l'essai d'écoulement à l'entonnoir (figure II.6).



(a) Cône à mortier



(b) Entonnoir à mortier

Figure II.5 : Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers [1]

Ces essais permettent de déterminer deux grandeurs: L'étalement normalisé D, et le temps d'écoulement relatif T.

$$D = [(d^2 - d_0^2)/d] \quad \text{et} \quad T = (10/t)$$

Sachant que :

d : diamètre d'étalement ;

d₀ : diamètre inférieur du cône ;

t : temps d'écoulement en secondes ;

D : représente l'étalement : plus D est grand plus le mortier est fluide ;

T : représente la viscosité : plus T est faible, plus la viscosité est élevée.

Certains auteurs [17] et [18] et [19] montrent que pour un BAP, on admet D=5 et T=1.

Tableau II.1 : Exemples de formulations japonaises [20]

Type	Ciment KG/m ³	Laitier Kg/m ³	Cendres Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravillons KG/m ³	Eau Kg/m ³	Superplastifiant Kg/m ³	Agent viscosité Kg/m ³
I	200	200	100	0	704	898	165	6	0
II	180	220	100	0	753	926	170	7.7	1.5
III	300	0	0	200	700	910	170	8	0.2

4.2 Méthode Française

L'approche développée en France au LCPC par de Larrard et Sedran est basée sur le modèle d'empilement compressible, MEC, [21], [8] qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. D'après les auteurs, un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité.

Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire secs avec une précision de 1% à partir des caractéristiques des constituants telles que

- La densité apparente ;
- Les proportions du mélange ;
- Les distributions granulaires ;
- La compacité propre.

Ce modèle fait appel aussi à une valeur dite la viscosité relative (par rapport à celle de l'eau) pour un béton donné. Cette grandeur caractéristique est déterminée à partir des propriétés des constituants du squelette solide et de la teneur en eau

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (BétonlabPro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche [8], et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (Bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, béton autoplaçant). Des extensions de cette méthode de formulation sont effectuées par les mêmes auteurs [8] afin de prendre en compte plus de paramètres tels que les propriétés des bétons à l'état durci (retrait, fluage, module d'élasticité, résistance à la traction et à la compression).

La formulation peut être établie selon les procédures suivantes, rapporté par [22] :

- 1) Une combinaison initiale de liants et d'additif minéraux est à priori fixée (par exemple 70% de ciment et 30% de fillers calcaire). Quand plusieurs additions minérales sont disponibles le choix est gouverné par les expériences locales et/ou par des spécifications spéciales. Par exemple, si l'on recherche une croissance de la résistance au-delà de 28 jours, les cendres volantes sont préférables.
- 2) Le dosage de saturation en superplastifiant [23] est déterminé pour la combinaison de liants choisie. Il est possible que cette quantité de superplastifiant puisse conduire à un béton très visqueux, dans ce cas la moitié de la quantité du superplastifiant est choisie.
- 3) La demande en eau du liant est mesurée en présence du superplastifiant. C'est une façon de mesurer la compacité, qui nécessite l'application du modèle de suspension solide.
- 4) Les calculs sont élaborés en utilisant le modèle de suspension solide en tenant compte du confinement (le rapport v/V qui est illustré par la figure II.6). La viscosité relative est arbitrairement fixée à $5 \cdot 10^4$ (ce qui correspond à un BAP selon l'expérience du LCPC) et la teneur en eau est minimisée. Le rapport Addition minéral/Ciment est gardé constant (tel qu'il a été fixé dans l'étape 1), pendant que les proportions de granulats et de liants sont optimisées.
- 5) Le béton obtenu est gâché (un échantillon de 10 à 15 litre est suffisant) et le dosage en eau est ajusté de telle manière à obtenir la viscosité ciblée.
- 6) Le dosage en superplastifiant est ajusté de façon à obtenir l'étalement désiré (compris entre 60 et 70 cm) ou bien un seuil de cisaillement (doit nécessairement être inférieur à 500 Pa.). On peut noter que cela n'influe pas beaucoup sur la viscosité plastique. A ce niveau, le béton obtenu répond aux exigences en matière de seuil de cisaillement (l'étalement) et de viscosité plastique.
- 7) La résistance à la compression du béton est mesurée (si le temps le permet) ou bien estimée à l'aide d'une formule empirique. Pour ces raisons la formule classique de FERET a été généralisée pour être appliquée aux bétons contenant des additions minérales fines [22] :

$$F_c = \frac{K_g R_c}{\left(1 + 3.1 \times \frac{W + A}{C(1 + K1 + K2) + BFS}\right)} \dots \dots EQ - II.1$$

Où :

Kg : est un coefficient granulaire. On peut admettre les deux valeurs suivantes :

- $Kg = 5.4$ pour les granulats concassés,
- $Kg = 4.8$ pour les granulats roulés.

Rc : est la résistance du ciment mesurée sur un mortier ISO (les proportions sable : ciment : eau sont : (3:1:0.5))

W : est le dosage en eau du béton (en kg/m^3 , la quantité d'eau qui existe dans les additions est à ajouter)

A : est le volume d'air occlus (en l/m^3)

C, PFA, SF, LF et BFS sont respectivement les masses (en kg/m^3) du ciment, cendres volantes, fumée de silice, fillers calcaires, laitiers de hauts fourneaux.

- $K1 = 0.4 PFA/C + 3 SF/C$ ($K1 \leq 0.5$) est le coefficient pouzzolanique.
- $K2 = 0.2 LF/C$ ($K2 \leq 0.07$) est le coefficient d'activité des fillers calcaires.

Si la résistance est très élevée ou bien trop faible, une nouvelle combinaison de liants doit être choisie et le processus est reconduit à partir de l'étape 2. De toute façon, le dosage en eau n'a pas grande tendance à changer par rapport à celui de la formule de référence. Donc, une prédiction effectuée à l'aide de la formule de FERET peut être utile pour la détermination la composition finale du liant.

- 8) Finalement, l'évolution du comportement rhéologique doit être étudiée. Si la prise est jugée non adéquate, un retardateur peut être introduit.

Bien sûr, un essai de remplissage (comme le l'essai au L-box par exemple) peut être effectué dans le laboratoire avant toute utilisation du béton sur chantier.

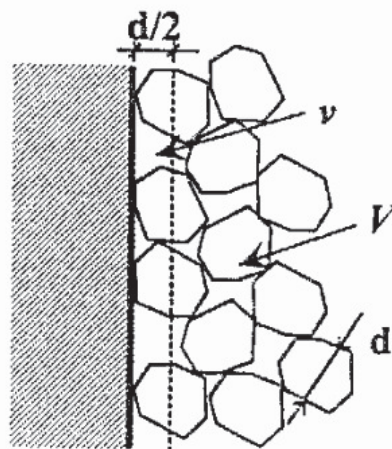


Figure II.6 : Représentation de l'effet de paroi Tiré de [25]

- V est le volume du récipient (volume de l'échantillon)
- v le volume perturbé par l'effet de paroi s'écrit, en fonction du diamètre des grains d (en mm)

Tableau II.2 : Exemples de formulation française Sedran [24]

Béton	Ciment Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Gravillons (10-14) Kg/m ³	Gravillons (5-12.5) Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Eau Kg/m ³	Super- plastifiant Kg/m ³
BAP 1	451	59	557	299	858	182.7	6.98
BAP 2	385	120	563	302	867	174.0	6.24
BAP 3	312	186	566	304	872	169.2	5.38
BAP 4	480	0	568	305	918	166.1	7.20
BAP 5	475	0	562	302	909	174.4	7.13
BAP 6	470	0	556	299	900	182.6	7.06

4.3 Méthode Suédoise par PETERSSON et al. (1996)

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995] cité par [22]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation le processus de formulation suivant :

Ils mesurent par ailleurs la compacité du mélange sable plus gravillon pour déterminer la quantité minimale de pâte nécessaire pour remplir les vides entre granulates. La figure II.7 présente les résultats où les auteurs ont déterminé la relation entre le volume de pâte et le rapport S_a (gravillon/granulates) pour différents espacements entre armatures.

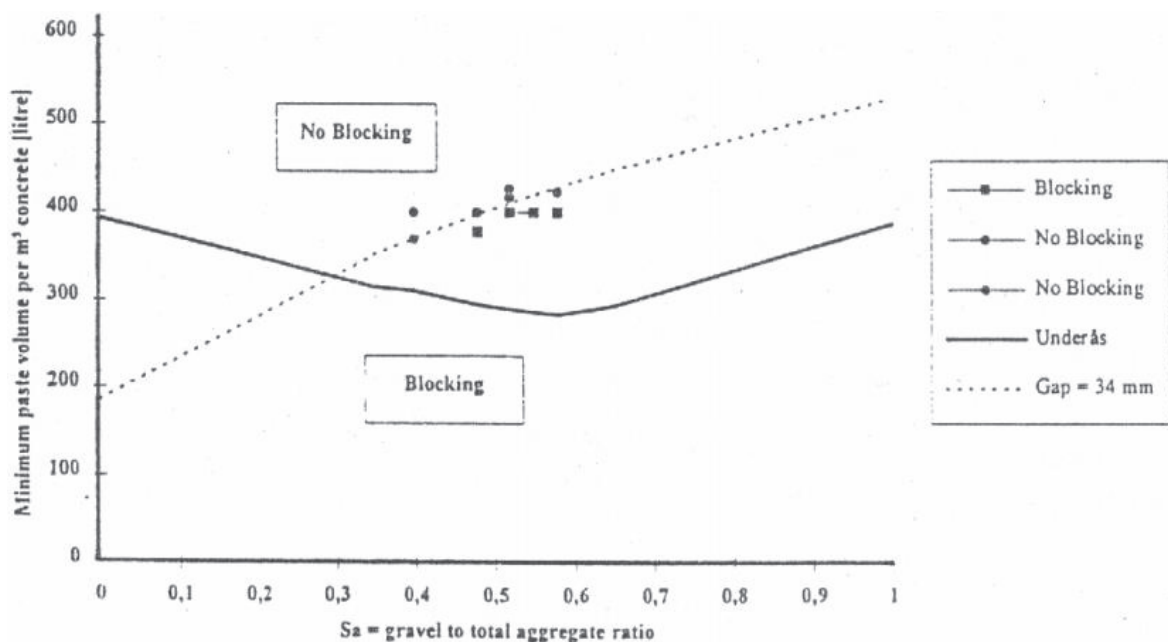


Figure II.7 : Courbes pour détermination du volume minimal de pâte. La courbe en gras détermine la quantité de pâte minimale pour remplir la porosité entre les granulats. La courbe en pointillés détermine le volume de pâte minimal pour éviter le blocage. (Tiré de [25])

Il faut toutefois noter que cette valeur est une valeur par défaut puisque le volume de pâte doit être supérieur au volume de pâte indiqué sur la courbe en gras pour écarter les granulats et avoir un étalement suffisant du béton. Les auteurs ne donnent pas de précision à ce propos et c'est une lacune de la méthode de formulation.

La composition de la pâte est déterminé, d'une part, par la résistance visée qui impose le rapport eau sur liant (E/L), et d'autre part, à l'aide de mesures rhéologiques sur le mortier dont on a enlevé les grains de dimensions supérieure à 250 μm . L'optimisation du mortier vise à réduire le seuil de cisaillement tout en ayant une viscosité suffisante en jouant sur la nature des liants, le dosage en eau et en superplastifiant. Les bétons ainsi formulés sont ajustés comme dans la méthode de formulation d'Okamura et Ozawa. Ceci est, d'ailleurs, en accord avec l'approche adoptée par les chercheurs de l'université de Tokyo (Okamura et Ozawa [26] ainsi que Ouchi et al. [27]).

4.4 Approche JSCE (Japanese society of civil engineers)

Cette méthode a été proposée par «the japanese society of civil engineers» en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques. Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité [28].

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

a) Quantité de gros granulats

Cette quantité varie selon l'autocompactibilité recherchée. Elle situe entre 0,30 à 0,32 m^3/m^3 et la valeur du diamètre maximum est entre de 20mm à 25mm.

b) Quantité d'eau

Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180 kg/m^3 dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/m^3 . En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite de 155 jusqu'à 175 kg/m^3 .

c) Rapport eau/poudre

Ce rapport est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte, on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massique eau/poudre doit être entre 28 et 37%.

d) Quantité de poudre et de liant

La quantité de poudre se déduit du rapport eau/poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 m^3/m^3 . Dans les autres cas, la valeur prise doit être entre 0,16 m^3/m^3 et 0,19 m^3/m^3 .

e) Quantité d'air

Cette valeur dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air.

f) Quantité de fins agrégats

Cette quantité est déduite des quantités précédentes.

g) Dosage en adjuvants

Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m³, pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres.

En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines) :

- De 0,15 à 0,30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques,
- 3 à 5% pour les acryliques,
- 2 à 3% pour les glycols,
- 0,05 % pour les polysaccharides solubles. [13]

4.5 Approche basée sur un plan d'expérience

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. KHAYAT et al [29] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (ciment+adition), le rapport massique eau sur fines, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité.

Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'Association Française de Génie Civil.

4.6 Autres Méthodes

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de « l'excès de pâte » : proposée par Oh et al [30], cette méthode est simple à utiliser, elle étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais.

Ainsi que la méthode de formulation chinoise, proposée par [31]. Cette méthode est basée au début, sur la compacité des granulats (sable et gravier) et, puis sur le remplissage des vides des granulats avec la pâte.

5. Discussion et comparaison entre quelques formulations

Etant donné que les différentes méthodes de formulation sont basées sur différents critères, la comparaison est difficile et nous pourrions dire que suivant les méthodes et vu la sensibilité de la formulation des BAP, les formulateurs doivent :

- Etablir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour assurer la fluidité du béton mais aussi son homogénéité,
- Jouer sur les dimensions et le volume des gravillons en gardant une certaine limite qui reste à bien définir pour éviter le phénomène de blocage, car la réduction du volume de la pâte et

l'utilisation des gravillons de petites dimensions influe négativement sur la résistance mécanique dans la gamme usuelle des bétons

- ❖ **L'approche japonaise** par sa simplicité présente un cahier des charges qui offre des teneurs en granulats arbitraires et faibles par rapport à d'autres approches, à afin garantir l'absence de tout blocage. Notons aussi que les auteurs ne précisent pas la nature des gravillons (roulés ou concassés) qui influe sur l'existence ou non de phénomène de blocage.
- ❖ **Petersson et al, (Méthode Suédoise)** Ils estiment par un confinement donné et pour chaque rapport gravillon sur sable, le volume de pâte critique pour le blocage. Mais il faut toute fois noter que :
 - Cette valeur correspond au volume de pâte minimal (courbe en gras sur la figure III.7) car le volume de pâte réel doit toujours lui être supérieur pour avoir un étalement suffisant,
 - Les auteurs ne donnent pas les limites visées dans leur approche.
- ❖ **Les chercheurs du LCPC** ont fait un travail considérable sur la formulation des bétons hydrauliques et sur le problème de rhéomètre, mais leurs études présentent deux limites :
 - Les paramètres rhéologiques sont propres au BTRHEOM, et que tout le monde n'utilise pas ce rhéomètre. Il reste toujours intéressant de comparer leurs résultats avec d'autres rhéomètres.
 - La formulation des BAP utilisée est peu réaliste sur le plan industriel (le dosage en ciment est élevé, la complexité de l'approche imposant des paramètres tels que les coefficients de confinement propres à leur expérience).

6. Formulation d'un BAP avec les matériaux locale en Algérie

N.Belas, O.Belarib, B.Boulakoud. et al, [33] se sont penché sur l'utilisation comme additif de la vase calcinée du barrage Fergoug dans la formulation d'un BAP, ils ont comparé un BAP formulée avec la vase calcinée a un BAP utilisant de la pozzolane naturelle de Béni-saf (l'ouest algérien).

La composition des deux BAP et d'un BAP témoin sans additions sont donnée dans le tableau II.3:

Tableau II.3 : Composition (en Kg) des trois BAP pour 1 m3 de béton frais [33]

Composition (Kg)	BAP T	BAP VF	BAP PZ
Ciment	448.16	407.96	410.23
Vase(Fergoug)	/	81.59	/
Pouzzoulane N	/	/	82.05
Eau	244.08	203.98	205.12
Superplastifiant	8.2	10.61	9.64
Sable de Mer	560	560	560
Sable de concassage	251	251	251
Gravier 3/8	333	333	333
Gravier 8/15	499	499	499

- BAP T : béton autoplaçant témoin sans additions
- BAP VF : béton autoplaçant avec vase de Fergoug
- BAP PZ : béton autoplaçant avec pouzzolane naturelle

Les caractéristiques des trois BAP sont données dans le tableau II.4

Tableau II.4 : Caractéristique des BAP utilisés [33]

Caractéristique	BAP T	BAP VF	BAP PZ
E/C	0.5	0.5	0.5
Ajout/Ciment (%)	-	20	20
Volume de pate (l/m ³)	375	375	375
G/S	1.02	1.02	1.02
Volume de squelette granulaire (l/m ³)	625	625	625

6.1 Caractéristique a l'état frais

Les résultats des essais de caractérisation des trois BAP à l'état frais, sont représentés dans le tableau II.5 :

Tableau II.5 : Résultats des essais de caractérisation à l'état frais [33]

Essai	Paramètre	Béton		
		BAP T	BAP VF	BAP PZ
Etalement	SF(cm)	70	68	68
	t50 (s)	3.56	3.83	3.69
Boite en L	h2/h1 (%)	89	83	86
	t20 (s)	2.39	2.58	2.41
	t40 (s)	3.76	3.98	3.80
Essai de J-Ring	Diametre (cm)	62	58	59
	H _{ext} (cm)	0.37	0.34	0.34
	H _{int} (cm)	0.54	0.51	0.50
	H _{int} - H _{ext}	0.17	0.17	0.16
Stabilité au tamis	%	6.91	5.11	5.87

Les essais de caractérisation à l'état frais (tableau II.4) ont montré que le BAP répond aux spécifications de l'AFGC [32].

6.2 Résistance en compression

La résistance mécanique est mesurée à différentes échéances. Des essais d'écrasement ont été faits sur des éprouvettes cubiques de dimension (7 * 7 * 7). Les résultats sont donnés ci-dessous :

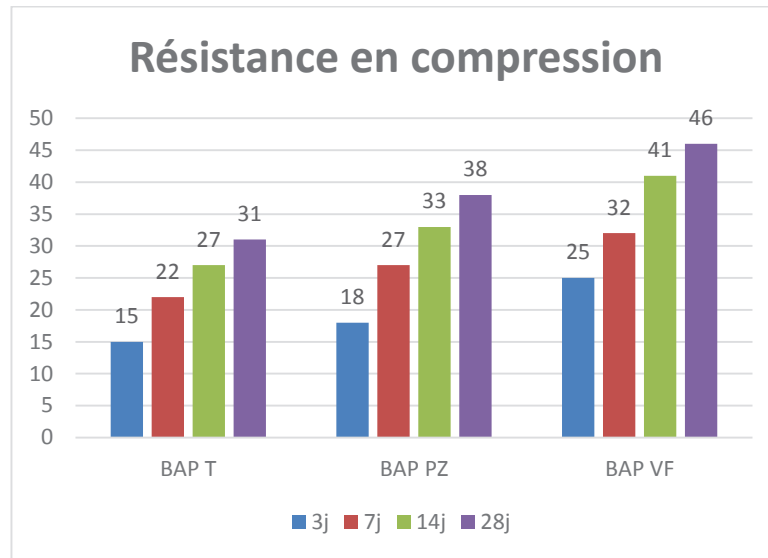


Figure II.8 : Comparaison de la résistance mécanique à la compression des différent BAP

En comparant les classe de résistance, le BAP a la base de la vase calcinée de Fergoug ((BAP VF) présont des résistance mécanique a la compréssion plus élevée (46 Mpa a 28 jour) par rapport aux BAP a base de la pouzzolanenaturelle de Béni-Saf.

7. Conclusion

Le challenge actuel consiste à maîtriser la formulation du béton autoplaçant dans plusieurs classes de résistance pour un prix compétitif, en prenant en compte d'une part le cahier des charges intégrant les performances rhéologiques et d'autre part les techniques et matériaux disponibles.

Chapitre III : Caractéristiques Rhéologique des BAP à l'état frais

1. Introduction

Lorsqu'on s'intéresse au BAP on se trouve souvent confronté au problème de caractérisation de ces bétons. La caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais consiste à décrire à l'aide d'un matériel adéquat, le comportement visqueux du béton.

2. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps [5]. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le développement de rhéomètres dédiés à l'étude de la rhéologie des bétons frais a permis d'identifier le comportement des bétons à l'état frais.

Plusieurs modèles ont été établis (Tableau III.1) et beaucoup de travaux ont traité de la pertinence et de l'adaptabilité de ces modèles pour décrire le comportement rhéologique des bétons [34].

Tableau III.1 : Modèles rhéologiques [34].

Références	Equation
Newonian [35]	$\tau = \eta\dot{\gamma}$
Bingham [36]	$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$
Herschel and Bulkley [37]	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$
Power équation [37]	$\tau = A\dot{\gamma}^n$ n=1 écoulement newotonien n>1 cisaillement épaississant n<1 cisaillement fluidifiant
Vom Berg [38] Ostwald-de-Waele [36]	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{C} \right)$
Eyring [37]	$\tau = a\dot{\gamma} + B \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{C} \right)$
Robertson-Stiff [37]	$\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni [37]	$\dot{\gamma} = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$
Paramètre :	τ = contrant de cisaillement τ_0 = seuil de cisaillement η = viscosité $\dot{\gamma}$ = vitesse de déformation $A, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$ = constantes

Il en ressort que le modèle de Herschel-Bulkley (Eq-III.1) permet la meilleure description de l'écoulement des bétons, il fait intervenir trois paramètres intrinsèques (τ_0 , k, n) qui permettent de décrire l'écoulement en régime permanent du matériau si celui-ci reste homogène (pas de ségrégation des particules) [49].

$$\tau = \tau_0 + K (\dot{\gamma})^n \dots Eq - III.1$$

Où

τ : est la contrainte de cisaillement (Pa) ;

τ_0 : le seuil d'écoulement en cisaillement (Pa) ;

K : le coefficient de viscosité ou facteur de consistance (Pa.sⁿ) ;

n : l'indice de viscosité ;

$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$: La vitesse de déformation (s⁻¹).

Si $n > 1$ le béton est dit rhéo-épaississant, si $n < 1$, il est dit rhéofluidifiant et si $n = 1$ le fluide est de Bingham.

Les caractéristiques rhéologiques du béton frais τ_0 , K et n sont accessibles à l'aide des rhéomètres à bétons tels que Rhéomètre plan-plan BTRhéom développé par le LCPC [26], le CEMAGREF-IMG à cylindres coaxiaux [10], le viscosimètre à plaque parallèle BML [26],



Figure III.1 : Rhéomètre BML à cylindres coaxiaux [39]

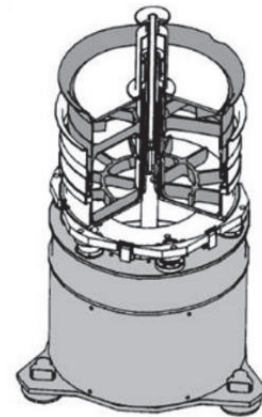


Figure III.2 : Rhéomètre plan-plan BTRhéom [39]



Figure III.3 : Rhéomètre à cylindres coaxiaux Cemagref-IMG (volume de l'échantillon de 500 L ; ce rhéomètre était initialement dédié à l'étude des laves torrentielles) [39]

Sedran [40] a utilisé le rhéomètre BTRhéom pour caractériser l'écoulement des bétons autonivelant et des BAP. Il a montré que le modèle de Herschel-Bulkley (Eq-III.1) permet une bonne description du comportement rhéologique de ces bétons. Cependant la nécessité d'identifier trois paramètres, τ_0 , K , n , rend l'utilisation de ce modèle difficile car elle est coûteuse en temps et en techniques d'expérience.

En pratique, on considère que le comportement des bétons à l'état frais s'apparente à celui d'un fluide viscoplastique à seuil et suit le modèle de Bingham (Eq-III.2) [41].

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \dots Eq - III.2$$

Où τ_0 le seuil d'écoulement en cisaillement (Pa), η la viscosité plastique (Pa.s).

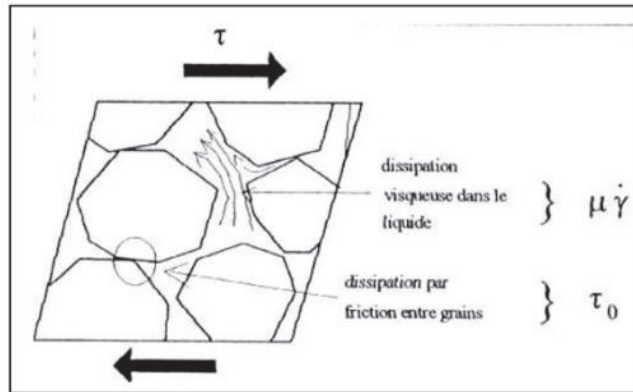


Figure III.4 : Interprétation physique du modèle de Bingham [42]

Ce modèle a été diffusé grâce aux travaux de G. H. Tattersall [29]. Il découle de celui de Herschel-Bulkley quand l'indice $n \rightarrow 1$. Il est fréquemment utilisé pour modéliser en première approche le comportement des BAP. Cependant, le modèle de Bingham ne permet pas toujours de modéliser l'écoulement des BAP [20]. En effet, son utilisation peut conduire à l'obtention de seuils d'écoulement négatifs.

De Larrard, Ferraris et Sedran [31], ont montré que les paramètres K et n du modèle de Herschel-Bulkley étaient liés, alors, ils ont proposé un modèle de Bingham «modifié» basé sur le modèle de Herschel-Bulkley mais ne contenant que deux caractéristiques rhéologiques indépendantes. La valeur du seuil d'écoulement, τ_0 obtenue par extrapolation en adoptant le modèle de Herschel-Bulkley est conservé, mais la courbe d'écoulement est remplacée par une droite obtenue par régression linéaire¹. La viscosité plastique est estimée en adoptant le modèle de Bingham (figue III.5). L'expression de la viscosité est alors en fonction des autres paramètres du modèle de Herschel-Bulkley :

$$\eta = \frac{3K}{n+2} \dot{\gamma}^{n-1} \dots Eq - III.3$$

K : le coefficient de viscosité ou facteur de consistance (Pa.sⁿ) ;

n : l'indice de viscosité ;

$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$: La vitesse de déformation (s⁻¹).

η : la viscosité plastique (Pa.s)

Un exemple de résultats obtenus par la méthode Bingham «modifié» est présenté sur la figure III.5

¹La régression linéaire est une procédure qui consistant à rechercher la droite qui passe au plus près d'un nuage de points.

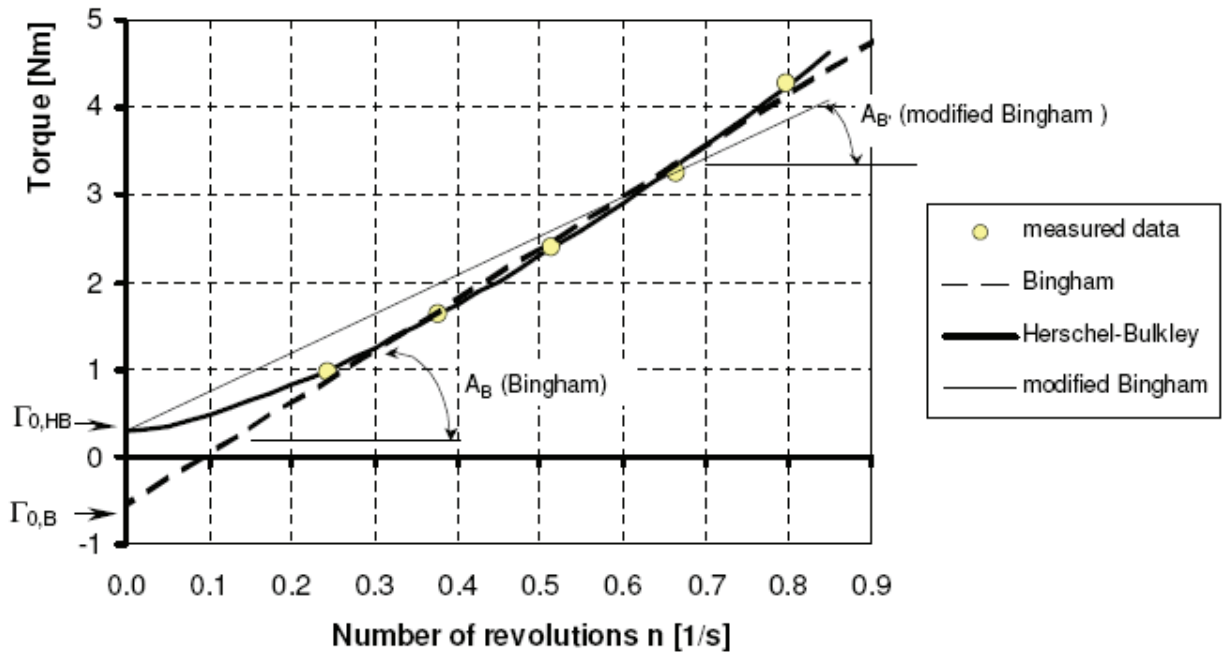


Figure III.5 : Modèle du comportement rhéologique d'un béton autoplaçants [43]

Pour les BAP, certains auteurs [44], [45] ont proposé un modèle basé sur celui de Bingham (Eq-III.4) permettant de décrire de façon satisfaisante l'écoulement de ces matériaux.

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \dot{\gamma} + C \times \dot{\gamma}^2 \quad \dots \quad Eq - III.4$$

Ainsi les deux caractéristiques rhéologiques fondamentales permettant la description de l'écoulement des BAP sont le seuil d'écoulement en cisaillement τ_0 (Pa) et la viscosité plastique η (Pa.s). D'un point de vue physique, τ_0 est contrôlé par le nombre et la nature des contacts entre les grains et donc par la compacité du squelette granulaire alors que η est reliée à la circulation de la phase liquide dans les porosités inter-grains [42]. Ainsi τ_0 représente la contribution de la phase solide et η celle de la phase liquide. Au-delà du seuil d'écoulement, τ_0 la contrainte appliquée est suffisante pour vaincre les frottements internes des grains solides et pour entraîner l'écoulement qui se traduit par des mouvements relatifs des grains solides et par la circulation de la phase liquide dans la porosité inter-grains.

Le tableau III.2 résume les plages de valeurs de ces caractéristiques rhéologiques pour quelque béton.

Tableau III.2 : Paramétré rhéologique du béton BAP et BV [39].

Matériaux	Béton auto-plaçant	Béton ordinaire
Seuil de cisaillement (N/m ²)	50-200	500-2000
Viscosité plastique (Ns/m ²)	20-100	50-100

3. Caractérisation d'un béton auto-plaçant a l'état frais

3.1 Classification des BAP

Les BAP sont classés en trois catégories suivant leur domaine d'utilisation. Le classement s'effectue suivant la valeur de l'intervalle d'écoulement noté « I » qui désigne le plus petit espace à travers lequel le béton doit s'écouler pour remplir correctement l'élément à bétonner (I tient compte de la géométrie des coffrages, de la disposition des armatures et des différents accès à un point donné pour le béton), le type d'application (horizontale ou verticale) et l'épaisseur (dans le cas d'application horizontale). Cette classification selon l'AFGC [32] est résumée dans le Tableau III-1.

Tableau III.3 : Classification des BAP [32]

	Longueur maximale de cheminement	Application horizontale				Application verticale	
		Epaisseur ≤ 300mm		Epaisseur > 300mm		Inférieure à 5m	Entre 5m et 10m
		Inférieure à 5m	Entre 5m et 10m	Inférieure à 5m	Entre 5m et 10m		
Intervalle d'écoulement	$I \geq 100$	(1)		(2) ^a	(2) ^b	(2) ^a	(2) ^b
	$80 \leq I < 100$	(2) ^a	(2) ^b	(2) ^a	(2) ^b	(2) ^a	(2) ^b
	$I < 80$	(3) ^a	(3) ^b	(3) ^a	(3) ^b	(3) ^a	(3) ^b

Trois catégories se dégagent :

La catégorie (1) correspond aux BAP utilisés pour des applications horizontales de faible épaisseur (inférieure ou égale à 300mm) et ayant un intervalle d'écoulement supérieur 100mm (anciennement appelés BAN - Bétons Auto Nivelant).

La catégorie (2) couvre principalement les BAP ayant un intervalle d'écoulement compris entre 80 et 100mm utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur (supérieur à 300mm) ou pour des applications verticales courantes. L'intervalle d'écoulement I est supérieur ou égale à 80mm.

La catégorie (3) concerne les BAP utilisés pour la réalisation d'ouvrages fortement ferrailés voire exigus et pour lesquels l'intervalle d'écoulement I est inférieur à 80mm. Pour une application, épaisseur et intervalle d'écoulement donnés, on distingue des sous-classes (2^a, 2^b, 3^a, 3^b) fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP dans le coffrage.

De façon pratique, un BAP est caractérisé à l'état frais à travers des essais de référence qui sont des essais empiriques de chantier.

3.2 Cahier des charges minimum à l'état frais:

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les

gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure III.6). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée. [5]

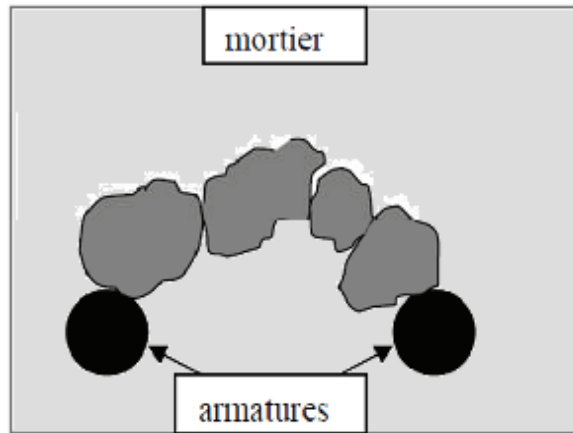


Figure III.6: Phénomène de blocage des granulats au droit des armatures [46]

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort pour assurer une bonne adhérence des armatures, et limiter les fissurations [47]

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

3.3 Propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton auto-plaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [48], [49].

a) Le remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton auto-plaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations. Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects [49].

b) La résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions [50],[51]. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

c) La capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement [48]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure III.7 ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

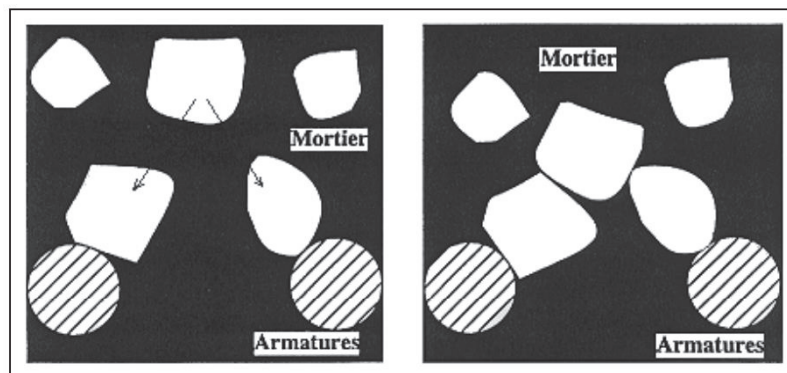


Figure III.7 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures [52].

Donc, un béton est qualifié d'auto-plaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation. Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Les propriétés essentielles des BAP frais [53]

<p>Pour Une Excellente Déformabilité</p>	<p>1. L'augmentation de la fluidité de la pâte :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'utilisation de Superplastifiants haut réducteurs d'eau, b. Par l'adoption d'un optimal rapport Eau/Liant, <p>2. La réduction des frictions intergranulaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. En diminuant le volume de gros granulats (un volume de pâte élevé), b. En utilisant un liant de granularité continue
<p>Pour Une Bonne Stabilité</p>	<p>1. La réduction des séparations des particules solides :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par la limitation de la teneur en granulats b. Par la réduction du diamètre maximal des granulats c. Par l'augmentation de la cohésion et de la viscosité : <ul style="list-style-type: none"> ➤ un petit rapport Eau/liant ➤ l'utilisation d'agent colloïdal (agent de viscosité) <p>2. La minimisation du ressuage :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. En adoptant un petit dosage en eau, b. En adoptant un petit rapport Eau/Liant, c. En utilisant des fines à grande surface spécifique, a. d. Et en augmentant le dosage en agent de viscosité.
<p>Pour Un moindre Risque de Blocage</p>	<p>1. Accroître la cohésion pour réduire la ségrégation des granulats :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'adoption d'un petit rapport Eau/Liant, b. Par l'utilisation d'agent colloïdal, <p>2. Respecter une compatibilité entre l'espacement des armatures et les granulats (volume et diamètre maximal) :</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Par l'utilisation d'un petit volume de granulats, a. b. En choisissant un petit diamètre maximal des granulats.

3.4 Essais de caractérisation sur bétons autoplacants

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais obéissent à certains critères établis selon les recommandations AFGC [48], ou JSCE [54], ou encore EFN [55]. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais.

Ce qui suit résume les différents tests d'ouvrabilité recommandée par AFGC et qui caractérisent les bétons autoplacants.

➤ Essai d'étalement (slump flow)

a) Mesure de l'étalement (essai au cône d'Abrams)

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement.

La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 750mm.



Figure III.8 : Essai d'étalement au cône d'Abrams [41]

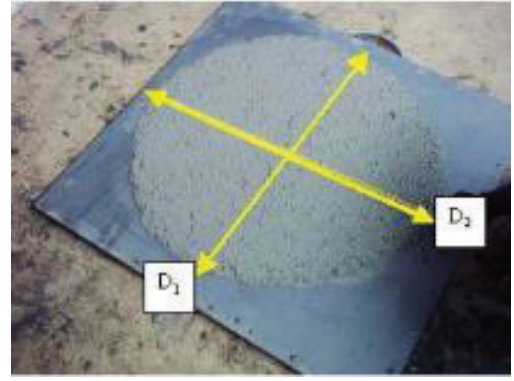


Figure III.9 : Principe de la mesure de l'étalement [41]

$$\text{Etalement} = D_{\text{moyen}} = SF = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette.

Ce type d'essai permet de donner des indications quant à la rhéologie des BAP en milieu non confinée.

En 2002, les recommandations en terme d'étalement admissible définissaient la fourchette 600-750 mm [56]. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies [57] :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm

a) Mesure de la vitesse d'étalement (Essais au cône d'Abrams)

C'est une mesure effectuée lors de l'essai d'étalement. C'est la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Pour des BAP cette valeur est, généralement, comprise entre 4 et 10 secondes. [58] [59].

➤ Essai de boîte en L (L-Box)

Cet essai est réalisé en utilisant une boîte ayant une forme en « L ». Elle 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 inacceptables.

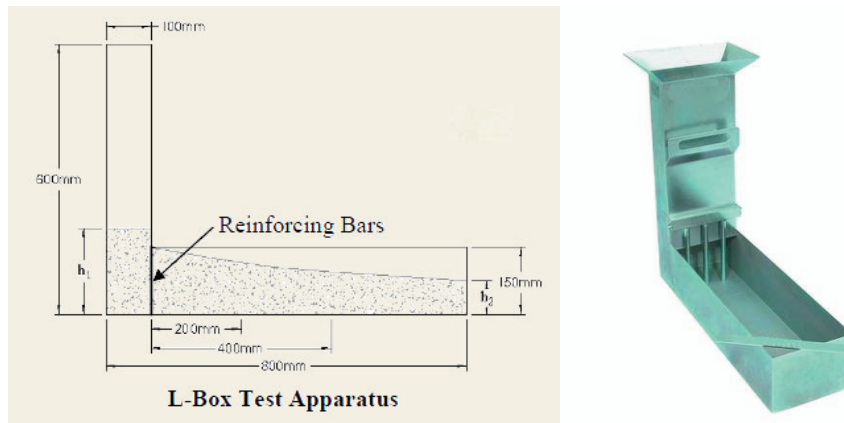


Figure III.10 : Appareil et dimensions de la boîte en L (L-BOX).

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage (figure III.11). L'AFGC [56] recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm.



Figure III.11 : Remplissage du béton dans la partie verticale de L-BOX et Ecoulement du béton après l'ouverture de la trappe [41]

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2 / H_1 (figure III.12). Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille. C'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Il est également possible d'exprimer le résultat de l'essai par la seule valeur de H_1 . Cette mesure est plus précise que le rapport H_2/H_1 mais son utilisation est moins répandue.

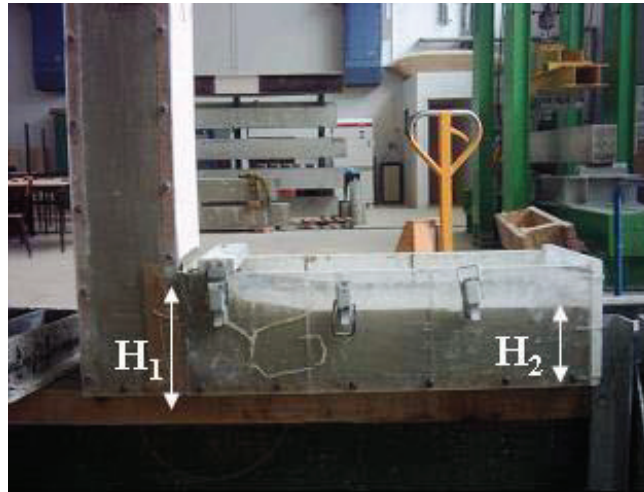


Figure III.12 : Mesure du taux de remplissage [41]

➤ Essai de J-RIN

Cet essai a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu fortement ferraillé. L'équipement nécessaire à la conduite de l'essai est formé par (figure III.13):

- Même plateau que l'essai d'étalement en milieu non confiné.
- Cône d'Abrams.
- Anneau équipé de barres en acier (J-RING)
- Mètre ou réglet de 90 centimètres.



Figure III.13 : Essai de J-RING [41].

Le principe de l'essai est de placer le cône d'Abrams au centre du plateau métallique entouré du J-RING, puis de remplir d'une quantité représentative de béton. Il faut ensuite soulever le cône puis mesurer l'étalement obtenu ainsi que les hauteurs de bétons situées au centre du plateau et à la sortie des barres du J-RING (figure III.14).

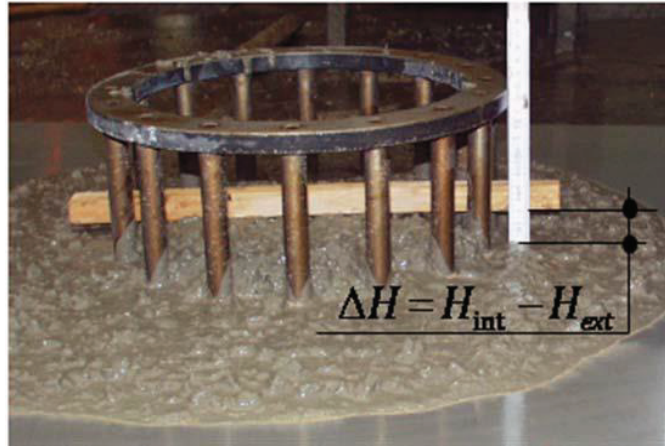


Figure III.14 : Mesure d'étalement en milieu confiné [41]

$$(\Delta H = H_{int} - H_{ext}).$$

➤ Essai de V-funnel

La procédure d'essai du V-funnel est la suivante: l'entonnoir dont les dimensions sont définies (figure III.15) est rempli de béton jusqu'à arasement. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le béton autoplaçant.

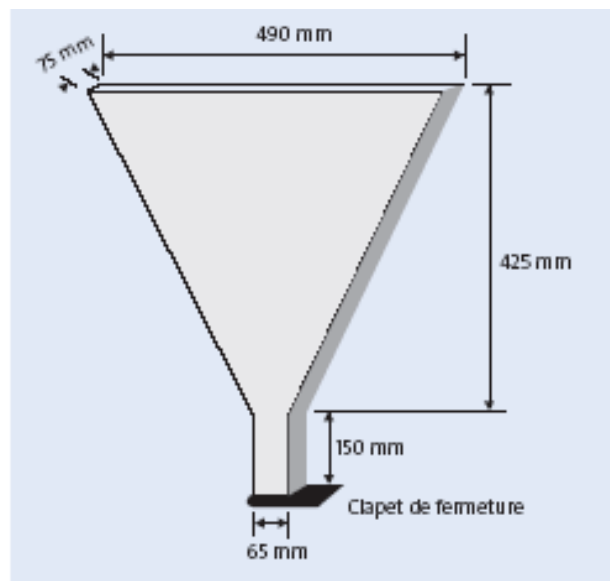


Figure III.15 : Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton [41]

➤ Essai de stabilité au tamis

C'est un essai qui caractérise la ségrégation statique des bétons autoplaçants. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation en laboratoire ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier. L'équipement nécessaire à la conduite de l'essai est formé par un seau de 10L muni d'un couvercle, un tamis de maille 5mm et de diamètre 315mm avec fond et une bascule de précision minimale de 20g et de portée 20Kg (Figure III.16).



Figure III.16 : Essai de stabilité au tamis

L'essai consiste à :

- Prélever une quantité de béton frais ($4,8 \pm 0,2$ kg) d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15mn.
- Observer et noter l'éventuelle présence de ressuage à la surface du seau après les 15minutes
- Peser le fond seul $\Rightarrow P_{\text{fond}}$
- Peser l'ensemble tamis muni de son fond vide $\Rightarrow P_t$
- Déverser sur un tamis de maille 5 mm cette quantité avec une hauteur de chute de 50 cm
- Peser le poids de l'échantillon versé $\Rightarrow P_{\text{échantillon}} \leq 4.8$ Kg
- Peser après 2 minutes la laitance qui a traversé le tamis « P_{laitance} ».
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par

$$p_{\text{laitance}} = p_t - p_{\text{fond}}$$


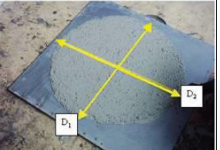




$$\ll \pi \gg \rightarrow \pi = \frac{p_{\text{Laitance}}}{p_{\text{échantillon}}}$$

Le béton est qualifié d'autoplaçant si sa stabilité est satisfaisante. Sinon la composition doit être revue:

- $\%0 \leq \% \pi \leq \%15 \rightarrow$ stabilité satisfaisante
- $\%15 < \% \pi \leq \%30 \rightarrow$ stabilité critique nécessitent la vérification de la ségrégation du béton in situ
- $\% \pi > 30 \rightarrow$ très mauvaise stabilité et ségrégation systématique : béton inutilisable

Pour qu'un béton soit qualifié d'autoplaçant, il doit satisfaire les différents essais de caractérisation adoptés par les recommandations AFGC [59] résumées dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais

Type d'essai	Grandeur spécifique	Recommandations AFGC	Photos
Essai Slump flow	$SF (mm)$	Étalement : $60 \text{ cm} \leq \frac{D_1 + D_2}{2} \leq 80 \text{ cm}$ Il caractérise la fluidité et la maniabilité du béton	
	$T_{500} (s)$	$2 \leq T_{500} \leq 5$ (EFN [58])	
V- Funnel	$t_v (s)$	Temps d'écoilement $8 \leq t_v (s) \leq 14$ Il caractérise la viscosité du béton autoplaçant.	
Essai de J-Ring	$\Delta H \text{ cm}$	$\Delta H = H_{int} - H_{ext} \leq 5 \text{ cm}$ Il caractérise la mobilité du béton dans un milieu confiné	
Essai de L-Box	$H_2/H_1 (\%)$	$H_2 / H_1 \approx 90\%$ Il caractérise la mobilité du béton et son écoulement dans un milieu confiné	
Essai de stabilité au tamis	$\pi (\%)$	$0 \leq \pi (\%) \leq 15$ Il caractérise la stabilité du béton et la limite de ségrégation	

4. Corrélation entre grandeurs spécifiques expérimentales et caractéristiques rhéologiques des BAP

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à trouver des corrélations entre les caractéristiques rhéologiques (τ_0, η) et les grandeurs spécifiques obtenues à travers les essais empiriques les plus couramment utilisés ($T_{500}, SF, H_2/H_1, t_v, \dots$). 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 [61], [62] Ainsi, il est maintenant admis que la viscosité est corrélée au temps d'écoulement mesuré au V-funnel [60], [63], [62], [64] et [65] (figure III.17) alors que le seuil de cisaillement dépend de l'étalement [66], [62], [67].

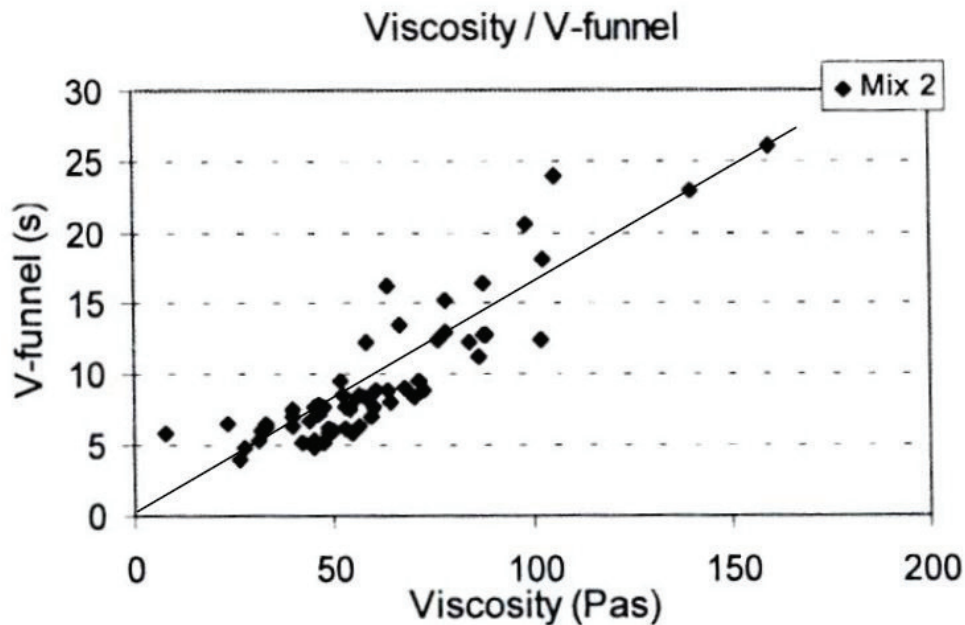


Figure III.17 : Corrélation entre la viscosité et la mesure du temps d'écoulement au V-funnel [60]

L'essai au cône d'Abrams est l'un des essais empiriques le plus utilisé. On en tire deux grandeurs spécifiques : l'étalement SF et le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500mm T_{500} .

- ❖ Une relation simple semble exister entre le seuil d'écoulement et l'étalement d'un BAP établie par Kurokawa [68] citée dans [62] :

$$SF = \frac{\rho_{BAP} \times g \times V_{cône}}{25 \times \pi \times \sqrt{3} \times \tau_0} \times 10^8 \dots Eq - III.5$$

Où ρ_{BAP} est la masse volumique du béton, g l'accélération de la pesanteur et $V_{cône}$ le volume du cône d'Abrams.

- ❖ Coussot et al [69] a proposé d'exprimer l'étalement en fonction du seuil de cisaillement et de la masse volumique du BAP « ρ_{BAP} » :

$$SF = 279 \times \left(\frac{\rho_{BAP}}{\tau_0} \right)^{1/5} \dots Eq - III.6$$

- ❖ Sedran [70] a proposé, suite à un grand nombre d'essais expérimentaux, une autre expression reliant le seuil de cisaillement à l'étalement :

$$SF = 808 - \frac{1174}{\rho_{BAP}} \times \tau_0 \dots Eq - III.7$$

Dans ces expressions τ_0 est mesuré avec un rhéomètre.

On retient qu'une relation linéaire existe entre l'étalement et le seuil de cisaillement mais que les paramètres dépendent de la composition du béton.

- ❖ D'autres expressions ont été utilisées pour relier SF à τ_0 telles que celle développée par JIN [62] (Eq. III.8).

$$SF = \alpha \times \exp\left(\frac{\beta - \tau_0}{\gamma}\right) \dots \dots Eq - III.8$$

Avec α , β et γ des réels positifs.

- ❖ Esping [71] propose une autre expression permettant de relier a SF à τ_0 en testant 550 formulations de BAP (Figure III.18) (Eq - III.9).

$$SF = -124.65 \times \ln(\tau_0) + 1071.82 \dots \dots Eq - III.9$$

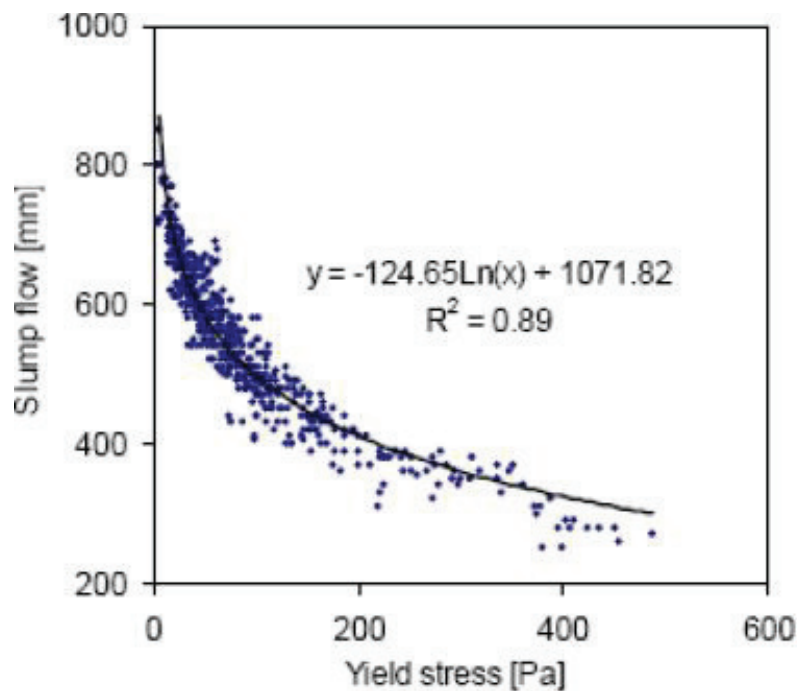


Figure III.18 : Corrélation entre le slump flow et le seuil de cisaillement [126]

- ❖ Haddad [72] a reporté sur un même graphique ses résultats expérimentaux et ceux obtenus par Sedran et conclut que les paramètres de formulation n'ont pas d'effet sur la relation entre le seuil de cisaillement et l'étalement et que cette relation est décrite par l'Eq.- III.10.

$$SF = 727 - 1398 \times \frac{\tau_0}{\rho_{BAP}} \dots \dots Eq - III.10$$

La deuxième grandeur spécifique obtenue à partir des essais au cône d'Abrams est le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500mm T_{500} , Certains auteurs Y. Kurokawa, et al [73] ont montré que, T_{500} ne dépend pas uniquement de la viscosité η mais également du seuil de cisaillement τ_0 (Eq - III.11).

$$\eta = 0.0545 \times \rho_{BAP} \left(1 - \frac{40 \times 10^3}{SF^2}\right) \times \left(1 - \frac{25 \times 10^3}{SF^2}\right) \times T_{500} \dots \dots Eq - 11$$

- ❖ Sedran [70] a proposé une nouvelle expression reliant la viscosité plastique aux grandeurs spécifiques obtenues à partir de l'essai empirique le cône d'Abrams (Eq – III.12). Cette expression a été validée à partir d'un grand nombre d'essais empiriques réalisés sur différentes formulations de BAP caractérisés, également, au BetRheom,

$$\eta = \frac{\rho_{BAP}}{1000} \times (0.026 \times SF - 2.39) \times T_{500} \dots \dots Eq - III.12$$

- ❖ Récemment Esping [71] a réalisé une campagne d'essais sur 550 formulations de BAP et a établi une nouvelle équation pour relier η à T_{500} et τ_0 (Eq – III.13).

$$\eta = \frac{T_{500}}{0.002 \times \tau_0} \dots \dots Eq - III.13$$

Les différents résultats présentés confirment l'existence de relations entre les grandeurs spécifiques mesurées à travers les essais empiriques et les caractéristiques rhéologiques des BAP. Cependant les paramètres de ces modèles varient souvent en changeant la composition du béton.

5. Conclusion

Pour pouvoir le qualifier d'autoplaçant, il faut s'assurer que le béton possède une très bonne capacité de remplissage qui résulte d'une déformabilité et d'une résistance à la ségrégation adéquates. De plus, le béton doit avoir une bonne stabilité volumique, c'est-à-dire diminuer au minimum le tassement, le ressuage et le retrait ces propriétés sont :

Capacité de remplissage - déformabilité - résistance à la ségrégation.

Chapitre IV : Caractéristique mécanique des Bétons Autoplaçants a l'état durci

1. Introduction

Evoquer le comportement mécanique instantané d'un béton consiste à définir ses principales caractéristiques, à savoir sa résistance en compression, son module d'élasticité en compression et sa résistance en traction (traction directe ou par fendage). Ces propriétés sont primordiales puisqu'elles constituent les paramètres de base des règles de dimensionnement des structures en béton armé ou précontraint.

2. Les caractéristiques mécaniques instantanées

2.1 Résistance à la compression

Les recherches sur la cinétique d'évolution de la résistance en compression des BAP ont montré qu'elle était globalement semblable à celles des bétons vibrés de même classe de résistance. Aucune différence significative n'est détectée dans la période avant maturation et la fin de l'hydratation du ciment conventionnellement considérée à 28 jours [74], [75], [76],

Toutefois, L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [77], [78]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Différentes données ont été publiées par Gibbs [79], et Sonebi [80] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir figure IV.1). Les travaux de Gibbs [79] ont montré que la résistance à 7j est plus élevée pour les BAP que celle de BV référence, en raison de la présence de filler calcaire qui accélère l'hydratation et la résistance à la compression au jeune âge.

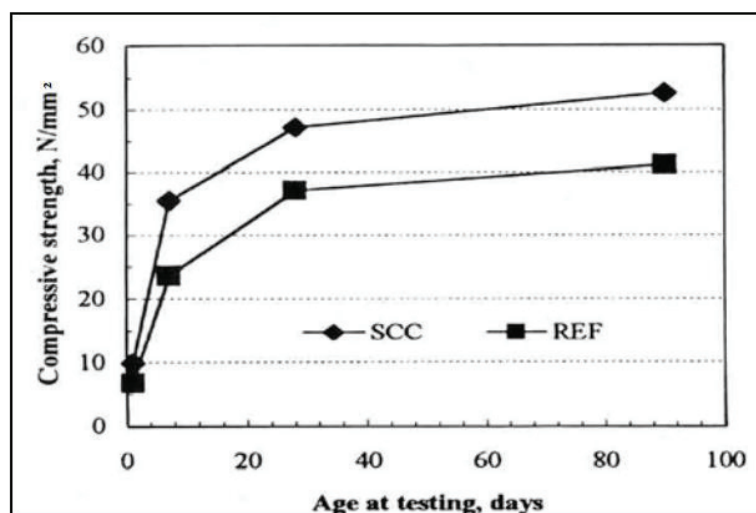


Figure IV.1 : Evaluation de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [79]

De plus, certains auteurs [81] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler est importante. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

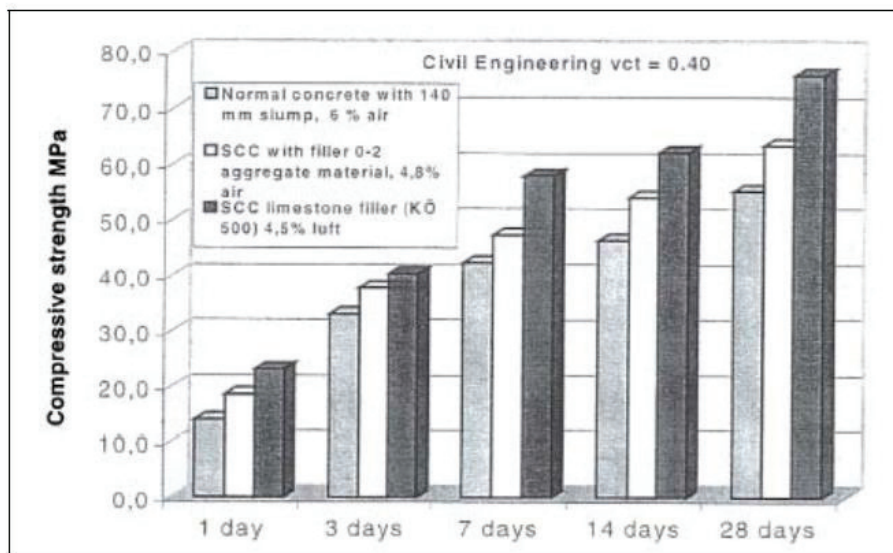


Figure IV.2 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de deux BAP (de formulation différent) [81]

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [82]

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [83]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants au jeune âge, que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

Un autre élément influençant la résistance à la compression est le volume de la pâte. Turcry et al. [84] montre que le volume de pate a un effet réel mais limité sur la résistance en compression. Il est observé une diminution de 12% de la résistance pour une augmentation de 57% du volume de pate. De même, Pineaud [85] constate que le volume de pâte a une faible influence sur la résistance en compression.

Parallèlement au volume de pâte, le rapport E/L est un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression. Pineaud [85] montre que l'influence du rapport E/L est comparable à celle obtenue par d'autres auteurs sur des BV [86, 87]. Les bétons autoplaçants présentent souvent une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire à un rapport E/C équivalent [88], [89].

2.2 Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [90].

Mais il est néanmoins important de noter que les écarts de valeurs entre BAP et bétons vibrés demeurent raisonnables. Certaines études [91], [92] ne distinguent pas de différence entre les résistances en traction des deux types de matériaux, si l'on tient compte de l'incertitude et des précisions des mesures, ou si l'on raisonne à même résistance en compression pour éliminer les variations de résistance en compression entre BAP et béton vibré [93].

KONIG [94] et SONEBI [95] constatent même de meilleures résistances en traction de la part de BAP, l'attribuant à une meilleure homogénéité des BAP. [96] associent cette augmentation de la contrainte ultime en traction à la déformabilité supérieure de pâte BAP de par sa plus grande quantité de pâte. [97] confirment cette observation et l'expliquent pour leur part par une résistance au transfert des contraintes de traction améliorée par la qualité de l'adhésion au niveau de l'interface pâte- granulat (*ITZ*, Interfacial Transition Zone).

Gibbs et al [89] ont fait des tests comparant les BAP aux bétons de référence, sur des éléments standards :

- Cubes de 150 mm, pour mesurer la résistance à la compression
- Des cylindres pour mesurer la résistance à la traction par fendage

Tableau IV.1 : Résistance à 28 jours pour des éléments standards d'après Gibbs et al [79]

Résistance a 28 jours	BAP	Référence (BV)
Résistance à la compression	47.2	37.1
Résistance à la traction (N/mm ²)	3.4	2.4
Résistance à la traction /Résistance à la compression	0.072	0.065

En revanche, des résistances inférieures ont été observées dans d'autres travaux de recherche pouvant atteindre une valeur maximale de 18% [98] Les hypothèses émises pour tenter d'identifier l'origine de ces résultats mettent en avant la grande quantité de filler utilisée et la nature du superplastifiant. En présence de superplastifiant de type polycarboxylate, [99] ont détecté la formation de gros cristaux de portlandite et d'ettringite qui pourraient fragiliser l'interface pâte-granulat et produire au niveau macroscopique une réduction de la résistance en traction du matériau.

2.3 Module d'élasticité (en compression)

Le module d'élasticité dépend à la fois des proportions et des modules des différentes phases constituant un béton. Or, un BAP est compose d'un volume de pâte important et de ratio G/S plus faible qu'un BV.

D'après différents codes (Eurocode ou DTU), le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons ($E_{ij} = 11000 f_{cJ}^{1/3}$). Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibre.

Or, si ceci est vrai dans certains cas, à la précision des mesures près (voir figure IV.3), d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [48], [100].

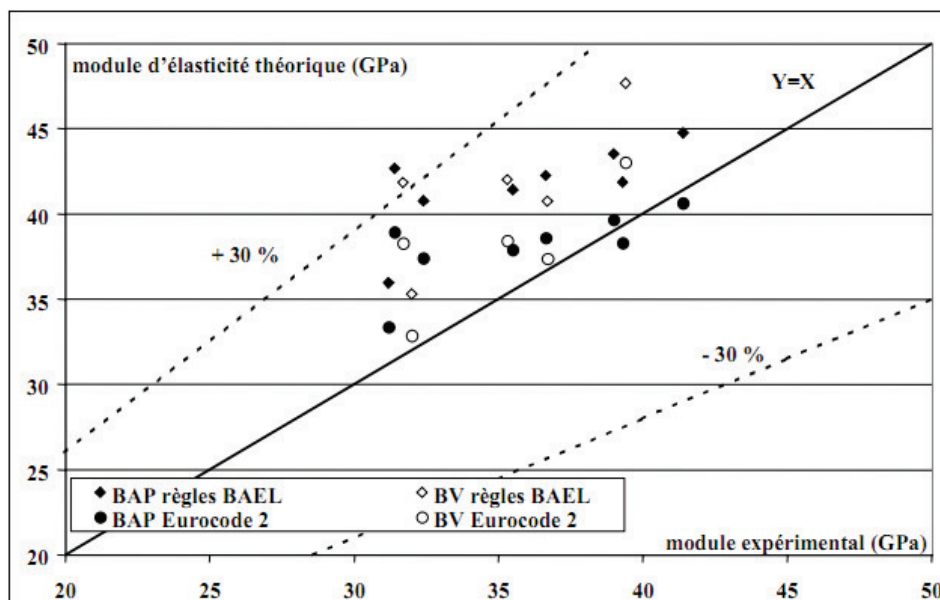


Figure IV.3 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [101]

Comme pour la résistance à la compression, d'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al. [102] montrent une diminution du module des BAP avec l'augmentation du volume de pâte. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).

A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires [87] (figure IV.4).

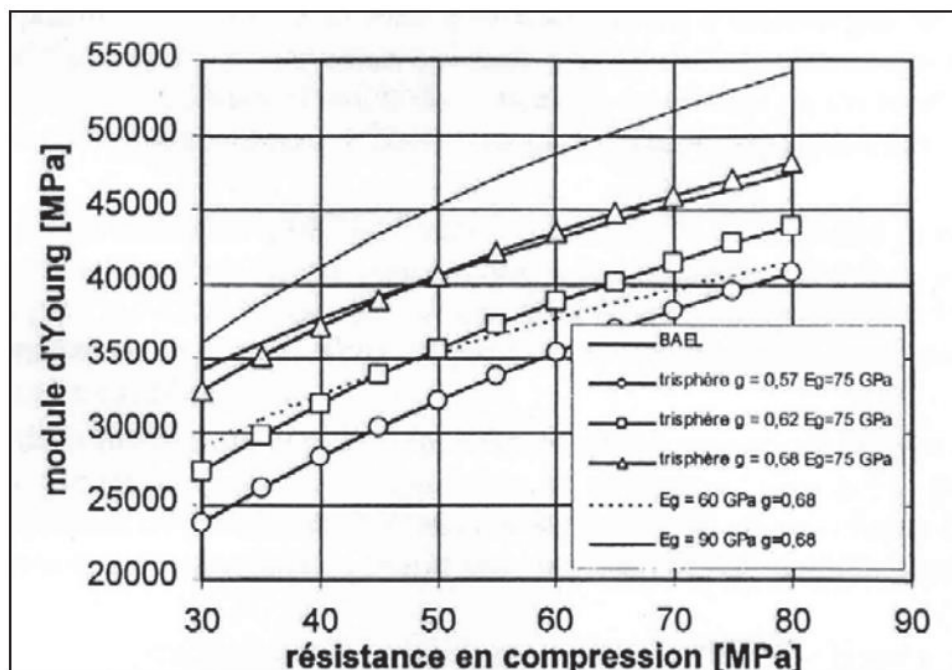


Figure IV.4 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [87].

Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L (Résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) [85].

Ainsi, pour des caractéristiques représentatives des bétons courants, à savoir un module E_g de 75000 MPa et une proportion de granulats (g) de 68%, les résultats sont très proches des valeurs prédites par le BAEL.

Par contre, lorsque les proportions granulaires sont plus faibles (57%), ce qui est le cas pour les BAP, le module calculé est plus faible de 7000 à 9000 MPa que celui prévu par le règlement, soit une diminution relative de 15 à 30%. Ces écarts deviennent deux fois moins importants pour une proportion moyenne de granulats ($g = 62\%$) puisque les modules sont inférieurs aux prévisions du règlement de 7 à 20% [87] (figure IV.5).

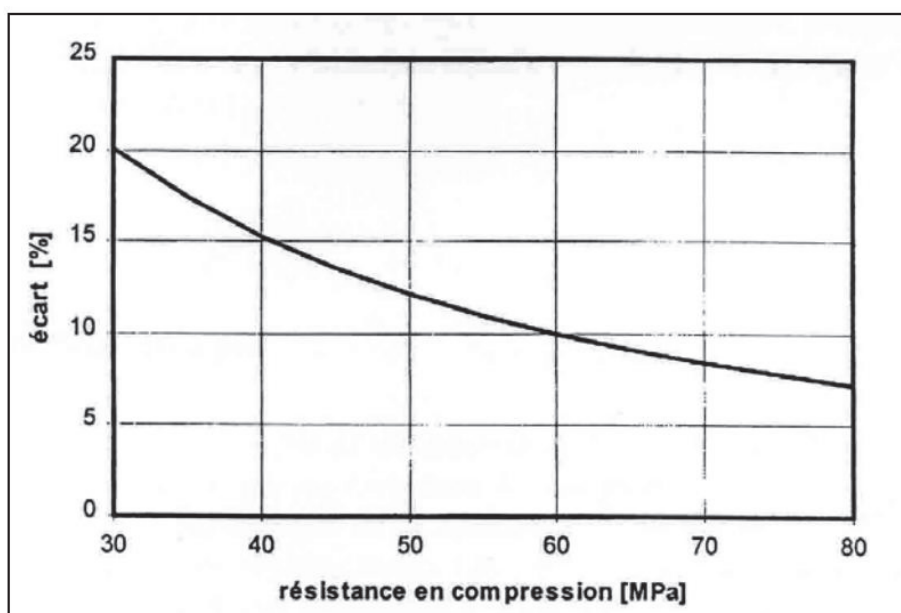


Figure IV.5 : Ecart relatif du module des BAP ($g = 62\%$, $E_g = 75$ GPa) par rapport aux prévisions du BAEL [103]

Paultre et al [104] ont fait des tests comparant les bétons autoplaçants aux traditionnels BV. Ils ont effectué des essais de compression (pour déterminer la résistance à la compression et le module d'élasticité) sur un BAP et un BV à affaissement plus faible mais ayant une résistance mécanique égale. Les résistances en compression des BAP et des BV sont comparables, par contre les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comme on peut l'observer sur les résultats de ces essais consignés dans le tableau IV.2

Tableau IV.2 : Principales caractéristique des bétons testés par Paultre et al [104]

Résistance visée (Mpa)	60	60	80	80
Nature du béton	BV	BAP	BV	BAP
Ration E/L	0.5	0.42	0.35	0.37
f_{c28}	54.1	60	71.9	80.9
Module d'élasticité (Gpa)	38	34.7	40.9	38.7

3. Comportement mécanique différé

L'évaluation des déformations différées libres « retraits » ou sous charge, « fluages », d'un matériau cimentaire est, comme pour le comportement instantané, indispensable pour le dimensionnement des structures. Elles permettent d'estimer les flèches finales (déplacements maximaux) des éléments de structure, les pertes de précontraintes et de calculer les redistributions de contraintes dans les structures hyperstatiques

3.1 Retrait (état frais, état durci)

Le retrait se décompose en trois formes de retraits distincts : le retrait thermique, le retrait endogène et celui de dessiccation [105].

- Le premier se produit entre la fabrication et le début de prise, il est provoqué par le refroidissement du béton suite à son échauffement dû aux réactions d'hydratation. Deux grandeurs sont à prendre en compte dans ce phénomène : la quantité totale de chaleur dégagée et la cinétique de production de chaleur. Cette dernière dépend de la composition du liant, du rapport E/L, tandis que la chaleur totale libérée découle, elle, de la masse de ciment et d'additions.
- Ensuite, apparaît le retrait endogène, dû à l'hydratation du ciment. Cette réaction se poursuit après la prise et s'accompagne d'une diminution de volume. Le retrait endogène, ou d'autodessiccation, est la conséquence macroscopique de cette contraction d'origine chimique.
- Enfin, le retrait de séchage, ou de dessiccation, est lié au séchage du matériau à partir de sa surface extérieure. L'eau contenue dans les pores de la pâte de ciment (et retenue par des forces capillaires d'autant plus grandes que la dimension de ceux-ci diminue) s'évapore vers le milieu ambiant, dont l'humidité relative est moindre, et crée une dépression qui contracte l'élément en béton

a) Retrait plastique

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré [106], [107]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (voir figure IV.6). Pour Turcry (figure IV.7), l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés.

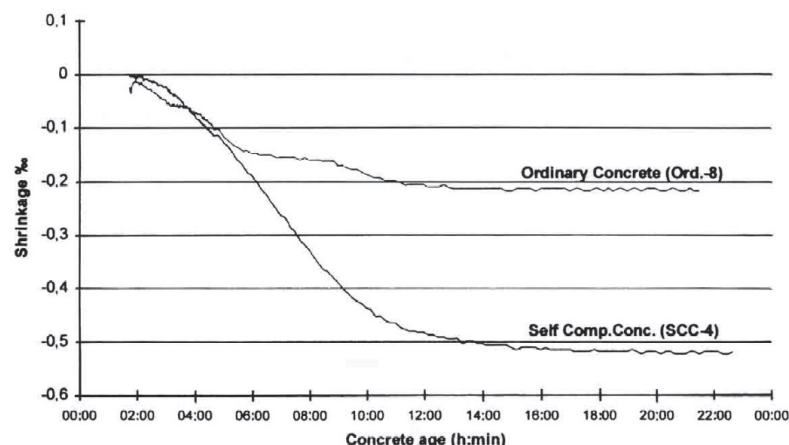


Figure IV.6: Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T = 20°C, 50% HR) [106]

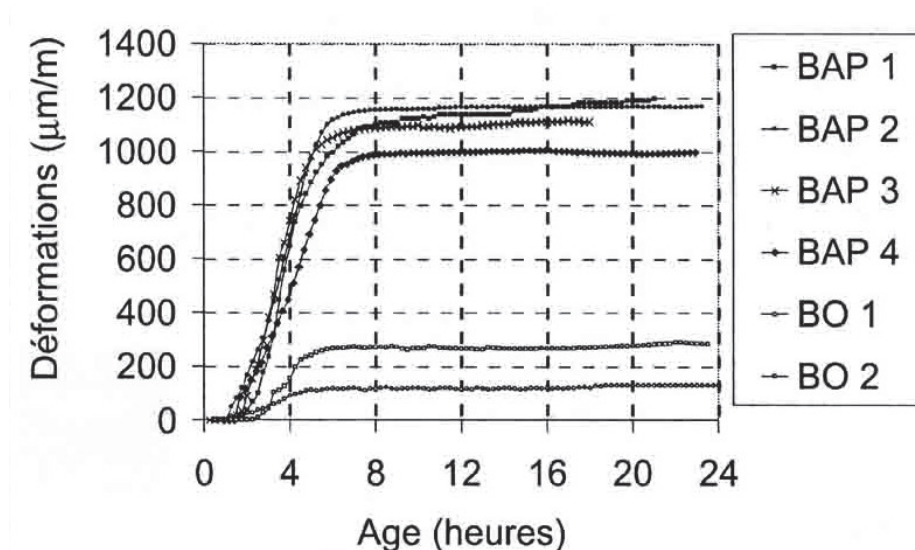


Figure IV.7 : Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés [107]

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon ces mêmes données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de la protection du séchage des BAP pour des applications horizontales (produit de cure, etc.) afin de contrôler la fissuration plastique qui peut en résulter. Celle-ci est souvent peu nuisible en elle-même mais fournit des amorces de fissures au retrait d'après prise et peut ainsi menacer la durabilité de la structure concernée.

b) Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [108] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (voir figure IV.8), d'autres [101] (figure IV.9) contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton

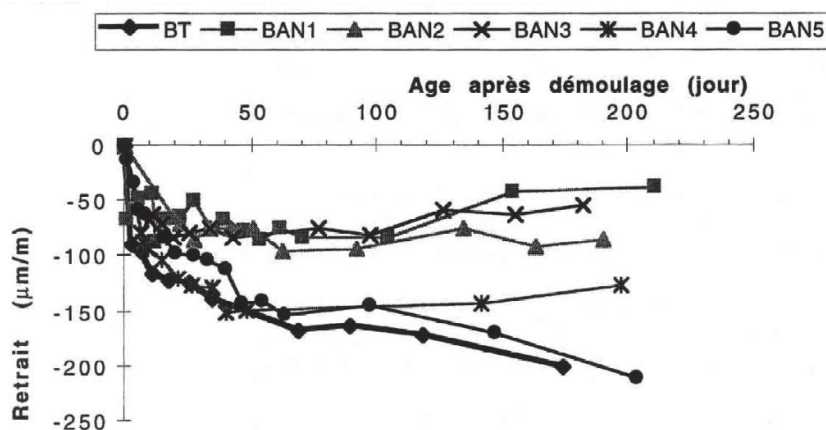


Figure IV.8 : Comparaison des retrait endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [108]

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [101] (figure IV.9).

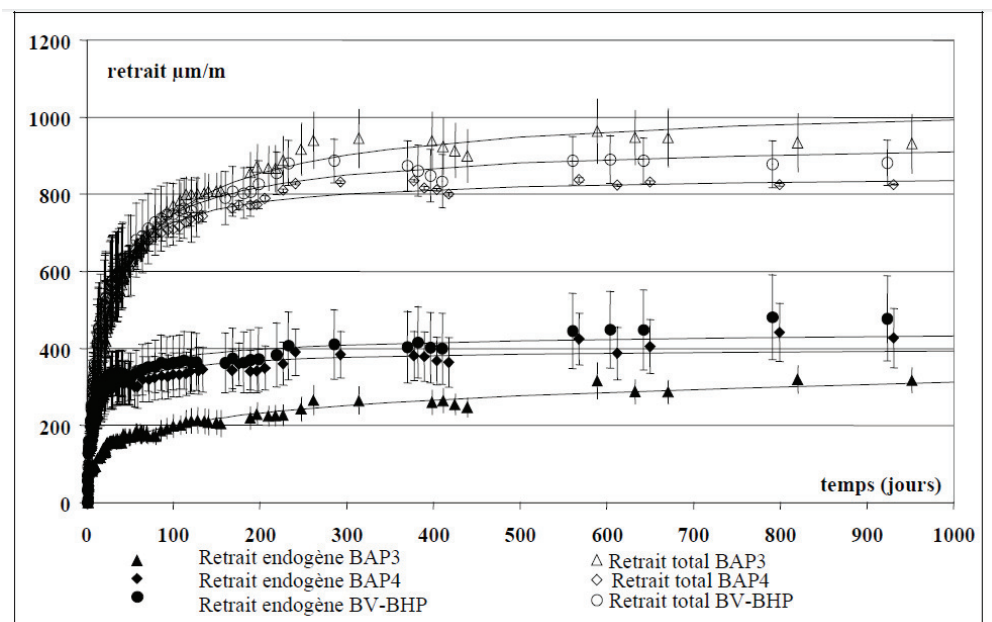


Figure IV.9 : Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [101]

Persson [109] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (voir figure IV.10).

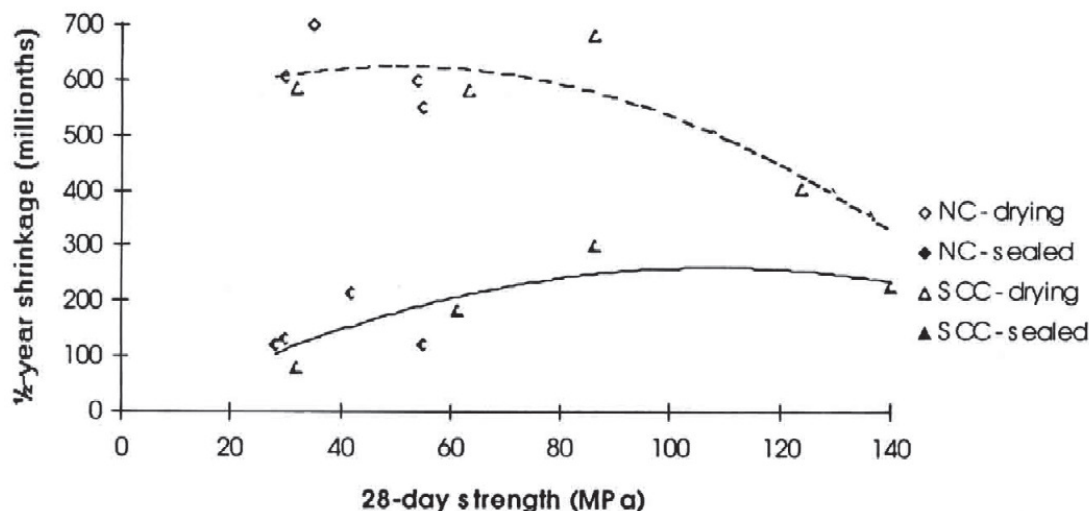


Figure IV.10 : Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [109]

c) Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [108] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir figure IV.11). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

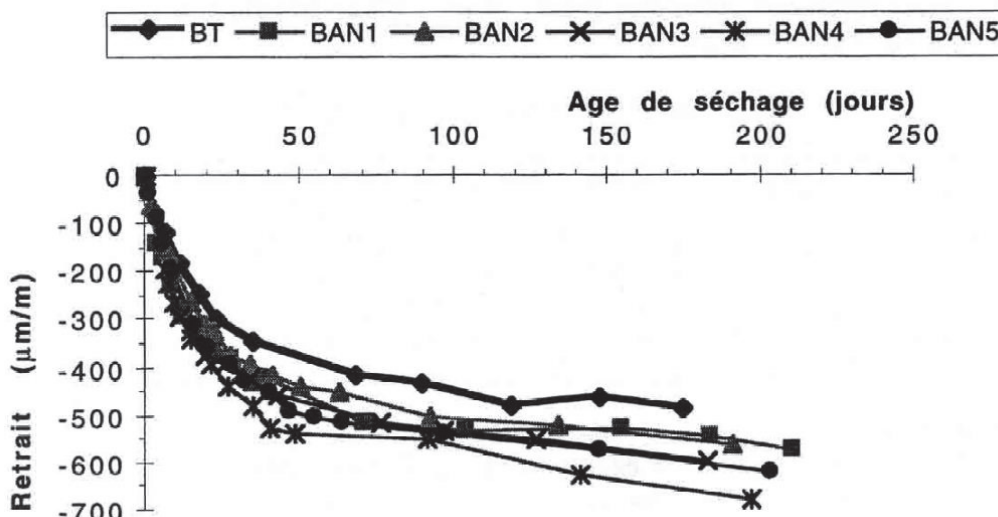


Figure IV.11 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [112]

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [109], [110]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs [111] observent des retraits de séchage des BAP moins importants (voir figure IV.12) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [112], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

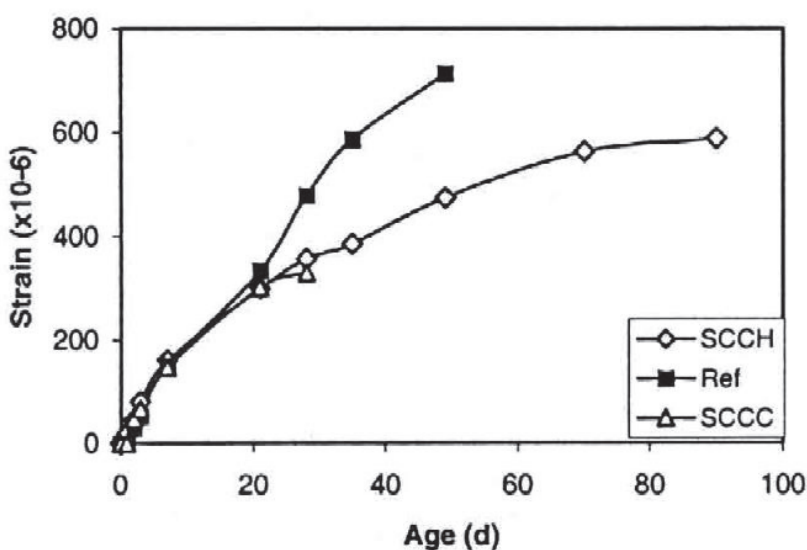


Figure IV.12 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [111]

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle (voir figure IV.13).

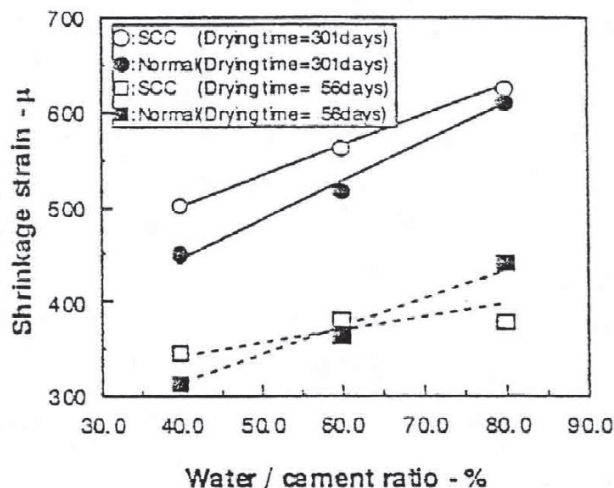


Figure IV.13 : Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [110]

Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. D'après Van [112], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [113].

3.2 Déformations sous charge (fluage)

D'après les résultats présentés par Proust [114], les comportements des bétons autoplaçants peuvent différer d'une formulation à l'autre (voir figure IV.14). Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à l'autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas avérée. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charge semblables à ceux des bétons vibrés.

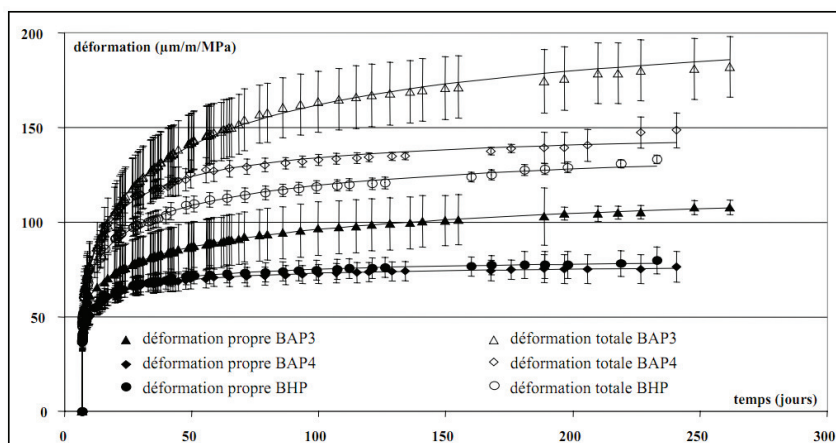


Figure IV.14 : Déformation sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 Mpa [114]

Cette concordance des comportements différés sous charge est confirmée par d'autres auteurs [115], [116]. De plus, selon certaine auteure [117], le manque de différence significative entre le fluage des BAP et celui des bétons vibrés est valable pour une gamme de résistances étendue (figure IV.15)

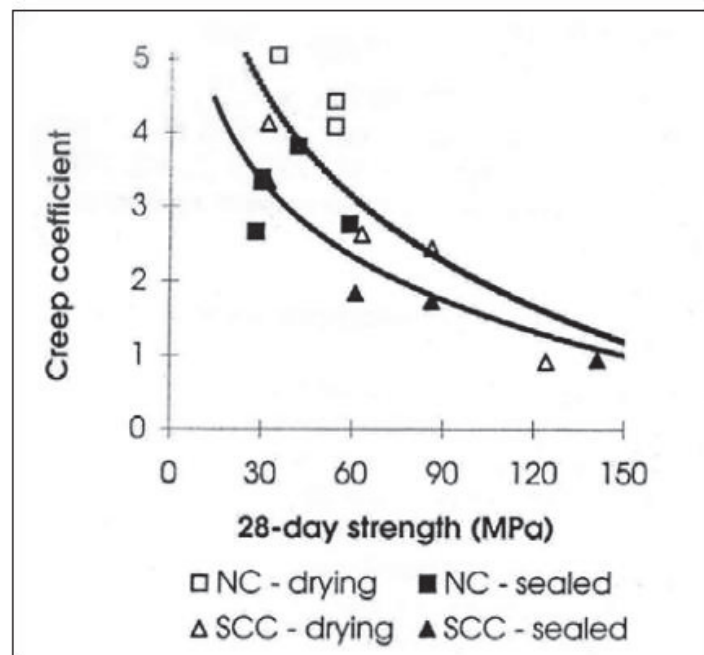


Figure IV.15 : Coefficients de fluage à 180 jours en fonction de la résistance mécanique [117]

Ces différents résultats concernent des formulations de BAP proches de celles des bétons vibrés, notamment avec des quantités de ciment équivalentes et des rapports E/C voisins.

L'influence du volume de pâte sur les déformations sous charge des bétons n'est pas réellement confirmée. Cette éventualité n'est pas exclue mais les comportements différés des BAP paraissent comparables à ceux des bétons vibrés. L'explication de cette observation n'est pas pour le moins évidente et appelle encore à quelques interrogations quant aux phénomènes impliqués dans le fluage du béton. Des études récentes [118] ont toutefois proposé certains mécanismes qui expliquent convenablement ce phénomène.

4. Conclusion

La particularité de la composition des BAP peu influée sur le comportement du BAP a l'état durci, cette influence se résume pour un grand nombre de cas par un léger gain de résistance du béton et une déformabilité plus importante comparée au béton vibré. Toutefois son comportement différé au jeune âge est important comparée au béton ordinaire.

Chapitre V : Domain d'utilisation et avantage des Béton Autoplaçants

1. Introduction

Les bétons autoplaçants offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines les constructions d'ouvrages d'art, renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès), construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de bétons pour toutes utilisations (béton coulés sous l'eau pour des réparations, bétons confinés, pieux, systèmes pour stabiliser des déchets...).

2. Domain d'utilisation des BAP

2.1 Application dans le Génie civil et Bâtiment

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

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

- Des densités de ferrailage importantes ;
- Des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
- Des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
- Des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- Des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
- Des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.

On cite Certains projets de construction qui ont utilisés comme matériau de construction, le BAP.

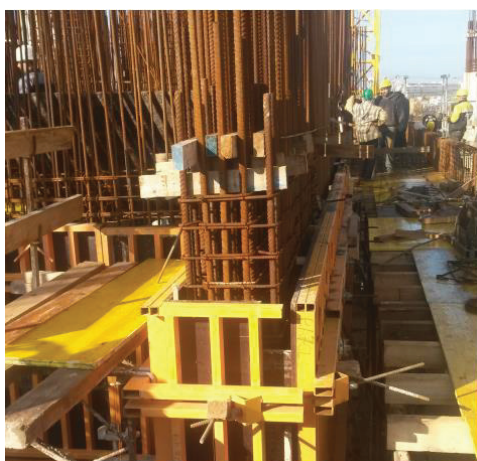


Figure V.1 : Elément de structure fortement armés ou l'utilisation des BAP est constitué la solution idéale

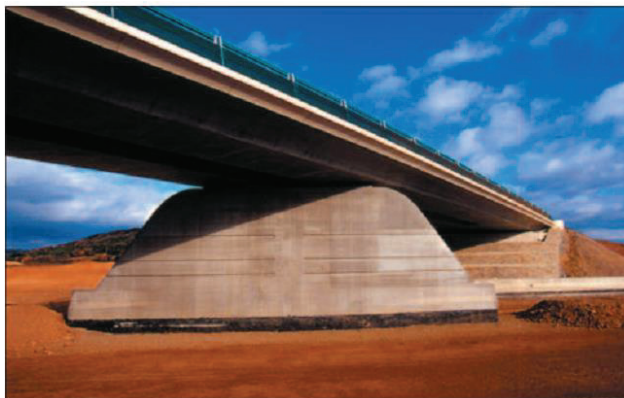


Figure V.2 : Ouvrage d'art [119]

Présentation : Trois ouvrages d'art monopiles avec un ferrailage complexe.

Localisation : Autoroute A75, Clermont-l'Hérault, France.

Spécificités : Réalisation de 3 monopiles pseudo-trapézoïdales (L 17,0 à 7,0 m x H 6,0 m x E 1,0 à 0,20 m) avec coulage de 200 m³ de BAP.



Figure V.3 : Voile d'un Bâtiment [119]

Présentation : Bibliothèque universitaire, Bâtiment R+2 d'une surface de 3 700 m².

Localisation : Mans, France.

Spécificités : Voiles ondulés en béton blanc (H 4,0 m) – 130 m³ de BAP Autoplaçant.

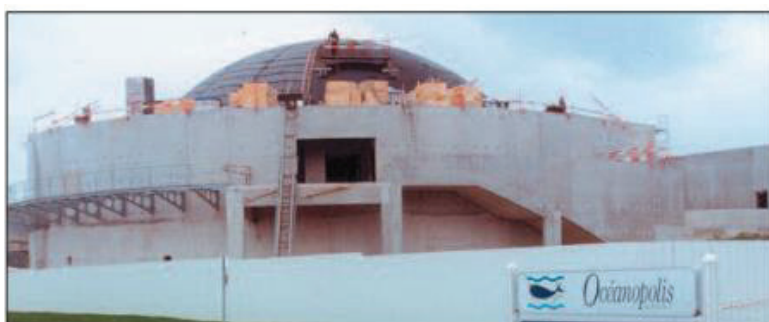


Figure V.4 : voiles courbes [119]

Présentation : Aquarium à requins, avec voiles majoritairement courbes, brut de décoffrage et de larges ouvertures.

Localisation : Brest, France

Spécificités : Voiles (25 rayons différents) – 2 500 m³ de BAP

2.2 Application des BAP dans l'industrie de préfabrication

Les évolutions de ces dernières années constituent, pour les composants préfabriqués en usine, des atouts particulièrement intéressants, tant sur le plan des performances que sur celui de la durabilité. L'emploi de matériaux plus performants et optimisés par l'Industrie du Béton devrait être source d'économie pour les ouvrages.

Les Bétons Autoplaçants utilisés depuis quelques années dans les usines de préfabrication facilitent la mise en œuvre des bétons en usine, améliorent l'aspect des parements et permettent de réduire l'impact sonore sur le personnel. [119].



Figure V.5 : Application du BAP a la préfabrication (a) (rapporté par [46])



Figure V.6 : Application du BAP a la préfabrication (b) (rapporté par [46])

2.3 Utilisation des bétons autoplaçants dans la réparation

Les BAP offrent des possibilités intéressantes dans les domaines de la réparation des infrastructures (application de couches minces, endroits difficiles d'accès, géométrie du volume à réparer, coffrages fortement ferrillés) [120].

On cite Certains projets de réparation qui ont utilisés comme matériau de réparation, le BAP.

a) Réparation des murs Jarry/Querbes à Montréal

Ce projet consistait à réparer et resurfer les murs, les culées et les piliers de pont d'un passage supérieur situé à l'angle des rues Jarry et Querbes à Montréal. Cette structure était âgée de plus de 50 ans au moment des travaux. Au cours du projet, 420 m³ de béton autoplaçant fibré ont été employés pour la réparation de 1700 m² de surface (murs de soutènement, murs de culée et piles), ce qui constitue une première réparation d'importance au Québec avec ce type de matériau [125].



Figure V.7 : Mis en place du béton autoplaçant [121]



Figure V.8 : Aspect final des réparations [121]

b) Parapets de la rue Me Dougall à Montréal

La réparation des parapets en béton de la rue Me Dougall à Montréal a été effectuée avec un BAP. Cette barrière de béton a été construite en 1959 et s'est détériorée par corrosion et délamination. Les parapets détériorés nécessitaient différentes épaisseurs de matériau de réparation dans sa longueur et sa hauteur. Le coffrage incluait une ouverture étroite pour couler le béton dans des directions verticales, diagonales et horizontales. Étant donné la complexité du coffrage, une vibration mécanique n'était pas possible. De ce fait, un BAP a été choisi pour la réparation en raison de sa fluidité et de sa déformabilité [122].

c) Réparation d'un tunnel a Dame-de-Grâce Québec

Le tunnel Notre-Dame-de-Grâce présentait, près de 40 ans après son ouverture, des signes importants de détérioration à sa voûte intérieure. Causée par l'infiltration de sels de déglacage, la corrosion des aciers d'armature faisait décoller le recouvrement de béton, menaçant ainsi la sécurité des usagers.

Une réparation de l'ensemble de la voûte du tunnel a été entreprise et réalisée au cours de l'été 2003. Les réparations ont été réalisées au moyen de béton autoplaçant. L'emploi de coffrages accrochés à la voûte a permis à l'entrepreneur de couler le béton de nuit tout en n'obstruant pas la circulation routière de jour. L'ensemble des travaux de réparation sur les 230 mètres de longueur du tunnel qui comporte 32 mètres de largeur a été complété en un total de 7 mois. Aucune fermeture de voies de jour dans le tunnel n'a été nécessaire.



Figure V.9 : Coffrage [123]



Figure V.10 : Aspect finale des réparations [123]

3. Avantage des BAP

3.1 Impact socio-économique

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- Une diminution du bruit sur site
- Une diminution de la pénibilité des tâches
- Une réduction des risques d'accident

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation. Dans le cas d'un chantier en extérieur, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain.

Malgré l'utilisation de procédés de construction de plus en plus mécanisés, les efforts physiques auxquels sont soumis les ouvriers restent pénibles. Avec l'apparition des BAP, les opérations traditionnelles de coulage, d'étalement, de talochage et de surfacage se réduisent à une étape de coulage suivie d'un débullage dans le cas des applications horizontales. Pour les opérations verticales, les divers déplacements sur les banches, à travers trappes et échelles, sont réduits de manière significative. De plus, le fait de vibrer le béton peut avoir de graves répercussions sur la santé et peut notamment provoquer des troubles de la circulation sanguine (maladie des « mains blanches »).

Par ailleurs, les BAP sont mis en place par des opérations simplifiées donc par des agents plus rapidement formés. Ils peuvent donc se concentrer sur la préparation des coffrages sans avoir à assimiler ou mettre en pratique les recommandations sur la vibration.

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc.

Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais direct et indirect, donc par « l'approche globale » suggérée par Malier [81].

Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

3.2 Mise en œuvre

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place.

En termes de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, que nous aborderons également dans la partie traitant de leur impact économique, est la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser.

Les propriétés d'écoulement des BAP permettent l'utilisation de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage) (figure de V.11 à V.13). La mise en œuvre par pompage permet une mise en œuvre plus rapide. Leur extrême fluidité nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages.

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage [79]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.



Figure V.11 : A la benne à manchette traditionnelle



Figure V.12 : A la pompe avec injection en pied de coffrage



Figure V.13 : A la pompe en tête de coffrage avec tube plongeur

3.3 Aspect esthétique des BAP et réalisation des parements

La cohésion élevée des BAP et l'absence des ségrégations garantissent la réalisation de parements de qualité, une finition soignée, une teinte homogène, l'absence de bullage et de ségrégation ainsi qu'une parfaite netteté des arêtes et des chanfreins, si les modes de mise en œuvre sont adaptés.

L'absence de vibration permet d'assurer de manière naturelle l'homogénéité du BAP dans la masse et donc l'uniformité des textures et des teintes.

L'offre étendue des BAP, des performances mécaniques courantes à très élevées, permet d'obtenir une multitude d'aspects de surfaces, de teintes et de textures.

La maîtrise des performances des BAP, la facilité et la fiabilité de leur mise en œuvre, garantissent la reproductibilité de l'aspect ainsi que la continuité et l'uniformité des parements au cours du chantier.

Les BAP offrent aux architectes une nouvelle liberté de construction:

- Les formes complexes deviennent possibles à réaliser ;
- Les exigences d'esthétisme, d'uniformité des parements et d'homogénéité des teintes peuvent être satisfaites.



Intérieur



Extérieur

Figure V.14 : Esthétique d'un Bâtiment réalisé avec un BAP « Centre culturel de Meudon [124]

4. Conclusion

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations sur chantiers et en usines de préfabrication, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Conclusion générale

Conclusion général

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires par leurs propriétés à l'état frais. Ils présentent des caractéristiques rhéologiques telles qu'ils se mettent en place sous leur propre poids, en restant homogènes, sans aucune vibration,

Les BAP offrent de réels avantages par rapport aux autres types de béton, leur très grande fluidité à l'état frais leur procure de multiples avantages en termes de facilité de mise en œuvre et d'impact socio-économique, avec une réduction significative de la pénibilité du travail des ouvriers en charge du bétonnage et une suppression du bruit généré par les habituels appareils de vibration utilisés pour compacter les bétons de fluidité ordinaire, donc un réduction des nuisance sonores considérable (béton silencieux).

Le désavantage principal de ce béton est qu'il entraîne un accroissement du coût dû à l'utilisation des adjuvants, à la fabrication et du contrôle sur chantier,

Cependant, de manière globale, des économies résultant de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d'œuvre et de l'amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées.

Bibliographie

[1] - **Y, Boucheneb.** *Retrait plastique des bétons autoplaçants.* Université Mouloud MAMMERI Faculté du Génie de la Construction Département de génie civil. Tizi-Ouzou : s.n., 2011. p. 137.

[2] - **Okamura, H et Ozawa, K.** *Self compactable high performance concrete in Japan*” *ACI International Workshop on high Performance Concrete.* Bangkok, Thailand : s.n., 1994. Thèse.

[3] - **Hayakawa, M, Matsuoka, Y et Yokota, K.** *Application of super workable concrete in the construction of 70_story building in Japan.* Japan : ACI, 1995. p. 154.

[4] - **BENAKLI, SARAH.** *Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout des déchets de construction.* Génie Civil, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou : s.n. p. 162, Thèse.

[5] - **Entreprise Régionale des Cimenterie de l’Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta.** *Rapport d’essais préliminaires, «Etude de ciments aux ajouts.* Ain-Touta : s.n., 2005.

[6] - **Febelcem.** *Les bétons autoplaçants.* Bruxelles : Fédération de l’industrie Cimentière Belge, août 2005.

[7] - **Dreux, G et Festa, J.** *Nouveau guide du béton et de ses constituants.* [éd.] 8. Eyrolles : s.n., 1998.

[8] - **De Larrard, F et Sedran, T.** *"Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research.* 2002. pp. 1699-1704.

[9] - **Boukni, B.** *tenue au feu des bétons autoplaçants.* UMC. 2007. thèse de magister.

[10] - **Bethmont, Sandrine.** *Mécanismes de ségrégation dans les betons autoplaçants (BAP).* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, France : s.n., 2005. p. 166, Thèse.

[11] - **Haddad, O.** *Contribution au développement d’outils d’aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l’état frais et à la résistance au jeune âge.* France : s.n., 2007. thèse de doctorat

[12] - **Chopin, D.** *Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants -Optimisation du temps de fabrication.* France : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juin 2003.

[13] - **Abib, Z.** *Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants.* Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Département Génie Civil. Alger : s.n., 06 Juillet 2006. Thèse de Magistère.

[14] - **Sedran, T.** *Les Bétons Autonivelants.* LCPC. mars-avril 1995. pp. 53-60, bulletin. réf. 3889.

[15] - **Tucry, P.** *Retrait et fissuration des bétons autoplaçant. Influence de la formulation.* Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes. Nantes : s.n., 2004. thèse de doctorat.

[16] - **Loukili, Ahmed.** *Les béton autoplaçants.* [trad.] BAP. Paris : LAVOISIER. p. 261. Mécanique et Ingénierie des Matériaux.

[17] - **Bethmont, S.** *mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) -Etude expérimentale des interactions granulaires.* Ecole Nationaledes Ponts et Chaussées. décembre 2005. thèse de doctorat.

[18] - **Jin.** *Properties of mortar for self-compacting concrete.* l’Université de Londres. Londres : s.n., 2002. p. 398, Thèse.

[19] - **Sedran, T.** *Rhéologie et rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants.* Ecole des Ponts et Chaussées. 1999. p. 220, thèse.

[20] - **Oucief, Hocine.** *Les betons autoplaçants a fibrage mixte : leur reponse mecanique et bases de leur optimisation.* Université Badji Mokhtar « Faculté des sciences de l’ingénieur ». Annaba : s.n., 2006. p. 171, Thèse Doctorat Génie Civil .

[21] - **Sedran, T et 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 : s.n., 1999. pp. 321-332.

[22] - **Eddine, Bensebti Salah.** *Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux.* Université Mentouri, Faculté des Sciences de l’Ingénieur . Constantine : s.n., 02 Juillet 2008. p. 156, Thèse Magistère en Génie Civil.

[23] - **De Larrard, F.** *Formulation et propriétés des bétons à très haute performances.* 1988. Rapport de recherche LCP N°: 149.

[24]– **Sedran, T.** « Les bétons autonivelants- Synthèse bibliographique », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 196, p53-60 Mars-Avril 1995.

[25] - **Thierry, Sedran.** *Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants.* l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. mars 1999. Thèse de Doctorat .

[26] - **Okamura, H et Okamura, K.** *Mix design for self compacting concrete. Concrete library of JSCE.N°25,* june 1995.,

[27] - **Ouchi M., Hibino M. and Okamura H.,** *Effect of superplasticizer on self compactibility of fresh concrete, Transportation Research Board, 76th annual meeting, Washington, D.C. January 1997, pp 12-16.*

[28] – **Mouret, M et Kharchi, F.** : *Effet de la taille des granulats sur le comportement rhéologique des bétons (Application aux bétons autoplaçants).* Algérie Equipement. mai 2005.

[29] - **Khayat k.H., Ghezal A., Hadriche M.S.,** « *Utility of statistical models in proportioning self-compacting concrete.* » *In proceeding of the 1st International RILEM symposium of self-compacting concrete ; RILEM 1999.*

[30] - **Oh S.G., Noguchi T., Tomasawa F.** « *Toward mix design for rheology of self-compacting concrete* », *Proc of the first RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm, 13-15 Sept 1999.*

[31]– **N.SU, Kung-Chang Hsu, His-Wen Chai,** *a simple mix design method for self-compacting concret, Cement and concrete Research 31.2001.pp1799-1807.*

[32] - **AFGC.** *Recommandations de l'association française de génie civil pour l'emploi des Bétons .* Documents scientifiques et techniques , projet national. janvier 2008. p. 64.

[33] - **Belas, N, et al.** *Elaboration de Béton Autoplaçant a base de sédiments de dragage du barrage de Fergoug. Algérie Equipement. N°52, 2013.*

[34] - **De Larrard, F.** *La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performance.* Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées. 1996. pp. 61-69.

[35] - **Hu, C.** *Rhéologie des bétons fluides, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées.* OA 16, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Paris, France : s.n., 1995. p. 203.

[36] - **G. H. Tattersall,** *The workability of concrete, A view point,* Publication PCA, 1976.

[37] - **Atzeni, C et al.** *Comparison between rheological models for portland cement pastes, Cement and Concrete Research.* 1985. pp. 511-519 . Vol. 15.

[38] - **Beng, W.V. ,** *Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behavior of cement pastes,* *Cement and Concrete Research.* 1979. pp. 211-216. Vol. 31.

[39] - **Banfill, P, et al.** *Comparison of concrete rheometers: International Tests at LCPC .* October, 2000.

[40] - **Thierry, Sedran.** *Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants.* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. , mars 1999. Thèse de Doctorat

[41] - **Hilali, Abdellah el.** *Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : influence des fines calcaires et des fibres végétales.* Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie. France : s.n., 2009. Thèse Génie Civil.

[42] - **F. De Larrard** « *Structures granulaires et formulation des bétons* », *Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées,* OA34, Paris 2000.

[43] - **Wüstholtz, T.** *a model approach to describe the fresh properties of self compacting concrete (SCC).* s.l. : Otto-Graf-Journal, 2005. Vol. 16.

[44] - **Feys, D, Verhoeven, R et De Schutter., G.** *Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh Self-Compacting Concrete Appl.* 2007.

[45] - **Feys, D, Verhoeven , R et De Schutter, G.** *Fresh self compacting concrete, a shear thickening material.* [éd.] *Cement and Concrete Research.* s.l. : Issue 7, July 2008. pp. 920-929. Vol. 38.

[46] - **Zahouani, Hassan et Touaiti, Abdelaziz.** *Elaboration d'un béton autoplaçants à base de laitier de haut fourneau.* Université Kasdi Merbah. Ouargla : s.n., 2011. p. 97.

- [47] - **Cussigh, François**. article Ingénieur Vinci Construction France. 11-2007.
- [48] - **Association Française de Génie Civil, Bétons autoplaçants (AFGC)**. *Documents Scientifiques et Techniques, Recommandations provisoires*. 2000.
- [49] - **Turcry, P.** *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la formulation*. Université de Nantes. 2004. Thèse doctorale.
- [50] - **Skarendahl, A et Petersson, O.** *Self-Compacting Concrete: State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC*. France : RILEM Publications, 2001.
- [51] - **Legrand, C.** *La structure des suspensions de ciment, Le Béton Hydraulique*. s.l. : Presses de l'ENPC, 1982.
- [52] - **Sedran, T.** Les Bétons Autonivelants. [éd.] réf. 3889. *bulletin LCPC 196*. mars-avril 1995.
- [53] - **Khayat K. H., Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete**, ACI Materials Journal, V. 96, No. 3, May-June 1999.
- [54] - **Japanese Society of civil Engineering.** *Guide to Construction of High Flowing Concrete engineering*. Tokyo, au Japan : Gihoudou Pub, 1998.
- [55] - **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete.** *Specification, production and use/BIBM, CEMUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO*. May 2005. www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf
- [56] - **Association française de Génie Civil (AFGC).** *Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires*. juillet 2002. p. 63.
- [57] - **Projet National BAP.** *Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (BAP)*. Mars 2005 : s.n.
- [58] - **Hasni, L.** *Bétons Autoplaçants, Synthèse Bibliographique*. CEBTP. Juillet 1999. Rapport de Recherche N°. 98 004 /98-006.
- [59] - **Khayat, K.H, Ghazal, A et Hadriche, S.** *Factorial design models for proportionning self consolidating concrete*. s.l. : Materials and Structures, November 1999. pp. 679-686. Vol. 32.
- [60] - **Utsi, Emborg, Carlswald.** *Relation between workability and rheological parameters, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC*. Reykjavik, Islande, : s.n., Août 2003. pp. 154-164.
- [61] - **Domone, P.L et Jin, J.** *Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete " Proceedings of the First International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm*. s.l. : Sweden, 1999. pp. 109-120.
- [62] - **Jin, J.** *Properties of mortar for self-compacting concrete*. Université de Londres. Londres : s.n., 2002. p. 398, thèse.
- [63] - **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*. Stockholm : s.n., 1999. pp. 95-105.
- [64] - **Parrot, L.J.** *A review of carbonation in reinforced concrete*. [éd.] Slough. s.l. : Cement and Concrete Association, 1987.
- [65] - **D'Aloia Schwartzentruber, L, Le Roy, R et Cordin, J.** *Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC)*. s.l. : Cement and Concrete Research 36, 2006. pp. 1203-1213.
- [66] - **De Larrard, Fet al.** *Fresh Concrete : A Hershel-Bulkley Material, Materials and Structures*. 1998. pp. 494-498. Vol. 31.
- [67] - **Wallevik, J. E.** *relationship between the bingham parameters and slump* » CCR. 2006. Vol. 36.
- [68] - **Kurokawa, Y, et al.** *A Study on the Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete*. s.l. : Transactions of the Japan Concrete Institute, 1994. pp. 25- 32. Vol. 1.
- [69] - **Coussot, P, Proust, S et Christophe , Ancey.** *Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. [éd.] 1. September 1996. pp. 55-70. Vol. 66.
- [70] - **Sedran, T.** « *Rhéologie et rhéométrie des bétons: application aux bétons autonivelants*. OA 34, Ecole des Ponts et Chaussées. 1999. p. 220, thèse

-
- [71] - **Esping, O** , *Early age properties of self-compacting concrete – Effects of fine aggregate and limestone filler*. Department of Civil and Environmental Engineering Building Technology Chalmers University Of Technology Göteborg. 2007.
- [72] - **Hadad, O**. *Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des BAP relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge*. Université de Cergy Pontoise. décembre 2007. Thèse de doctorat .
- [73] - **Kurokawa, Y, et al.** *A Study on the Slump Test and Slump-Flow Test of Fresh Concrete*. Japan : Transactions of the Japan Concrete Institute, 1994. pp. 25-32. Vol. 16.
- [74] - **Turcry, P, et al.** *Cracking tendency of self-compacting concrète subjected to restrained shrinkage: expérimental study and modeling*. Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, . 2006. pp. 46-54.
- [75] - **Malier**. *Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons hautes performances*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, N° 298.
- [76] - **Assie, S, Escadeillas , G et Marchese, G.** *MARCHESE G., « Durability of Self- Compacting Concrète: a différent behaviour compared with vibrated concrète*. 3eme International RILEM Symposium Self-Compacting Concrète,. Reykjavik, Islande : s.n., 2003. pp. 655-662.
- [77] - **De Larrard , F.** *Concrete mixture-proportioning - A scientific approach ”*, *Modern Concrete Technology*. [éd.] 9. s.l. : E&FN SPON, , 1999.
- [78] - **Pera, J, Husson, S et Guilhot, B.** *Influence of finely ground limestone on cement hydration*. Cement and Concrete Composites. 1999. pp. 99-105.
- [79] – **Gibbs, J.C et ZHU, W.** *Strength of hardened self-compacting concrete*. Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7). Stockholm, Suède : s.n., 13-15 septembre 1999. pp. . 199-209.
- [80] – **Sonebi, M et Bartos, P.J.M.** *Hardened SCC and its bond with reinforcement ”*, *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)* .), Stockholm, Sweden. 13-15 septembre 1999. pp. 275-289.
- [81] - **Malier**. *Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons hautes performances*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, N° 298.
- [82] - **Felekoglu, B, Yardimci, M.Y et Baradan, B.** *A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self compacting concrete”*.. Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete (PRO 33), . Reykjavik, Iceland, : s.n., 17-20 août 2003. pp. 446-4456.
- [83] - **Shi, C, et al.** *Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete*. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, . s.l. : ACBM center, 12-13 novembre 2002. pp. 349-354.
- [84] - **Turcry, P, Rozière, E et Loukili, A.** *Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçant*. XXIIIemes Rencontres Universitaires de Génie-Civil. Grenoble : s.n., 2005.
- [85] - **Pineaud, A.** *Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication*. Université de Cergy-Pontoise. Cergy-Pontoise : s.n., 2007. p. 271, Thèse doctorat.
- [86] - **Kolias, S et Georgiou, C.** *The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete*. [éd.] 2. s.l. : Cement and Concrete Composites, 2005. pp. 211-216. Vol. 27.
- [87] - **De Larrard , L et Le Roy, R.** . *Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances*. *Materials and Structures*. 1992. pp. 464-475. Vol. 25.
- [88] - **S, Assié.** *Durabilité des bétons autoplaçants*. INSA . Toulouse : s.n., 2004. Thèse de doctorat .
- [89] - **Gibbs. j S et Zhu, W.** *Strength of hardend Self-Compacting concrete, Proceedings of the first international RILEM symposium on self-compacting concrete*. Stockholm, Suède : s.n., 1999. pp. 199-209.
- [90] - **Konig, G, et al.** *Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour*. Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), . Tokio, Japan : s.n., 2001. pp. 507-516.
- [91] - **Bosiljkov , V.B.** *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler*. [éd.] 9. s.l. : Cernent and Concrète Research, 2003. pp. 1279-1286. Vol. 33.

- [92] - **Loukili, A, et al.** *Cracking tendency of self-compacting concrete subjected to restrained shrinkage: experimental study and modeling.* s.l. : », Journal of Materials in Civil Engineering ASCE,, 2006. pp. 46-54.
- [93] - **Castel, A, et al.** « *Effect of reinforcing bar orientation and location on bond with self-consolidating concrete.* [éd.] 4. s.l. : ACI Materials Journal, 2006. pp. 559-567. Vol. 103.
- [94] - **Konig, G, et al.** *Bond of reinforcement in Self-Compacting Concrete (SCC) under monotonic and cycling loading.* 3rd International RILEM Symposium I Self-Compacting Concrete, . Reykjavik, Islande : s.n., 2003. pp. 939-947.
- [95] - **Sonebi, M et Bartos, P.J.M.** *Hardened SCC and its bond with reinforcements.* Proceeding of RILEM International Symposium on SCC,. Stockholm, Suède : s.n., 1999. pp. 275-290.
- [96] - **Dinakar, P, Babu, K.G et Santhanam, M.** *Mechanical properties of high volume of ash self-compacting concretes.* 5th International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, . Gand, Belgique : s.n., 2007. pp. 651- 658.
- [97] - **Klug, Y et Holschemacher, K.** *Comparison of the hardened properties of Self-Compacting and normal vibrated concrete.* 3rd International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, . Reykjavik, Islande : s.n., 2003. pp. 596- 605.
- [98] - **Parra, C, Valcuende, M et Benlloch, J.** *Mechanical properties of self-compacting Concretes.* », 5th International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, . Gand, Belgique : s.n., 2007. pp. 599-604.
- [99] - **Roncero, J et Gettu, R.** « *Influence of super plasticizers on the microstructures of hydrated cement paste and creep behaviour of cement mortar.* s.l. : Cemento-Hormigon,, 2002. pp. 12-28. Vol. 832.
- [100] - **Klug, Y et Holschemacher, K.** *Material properties of hardened self-compacting concrete.* Le Caire, Egypte : ICPCM – A new era of building, février 2003. pp. 18-20 .
- [101] - **Pons, G, proust, E et Assie, S.** *Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete.* Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33),. aout 2003. pp. 645-645; 17-20 .
- [102] - **Turcry, P, Rozière, E et Loukili, A.** *Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants.* XXIIèmes Rencontres Universitaires de Génie-Civil. Grenoble : s.n., 2005.
- [103] - **Le roy, R, De larrard, F et Pons, G.** *PONS G., « Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances, Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa.*, LCPC. 1996. pp. 63-84, Bulletin.
- [104] - **Paultre, Khayat, Langlois, Trudel, Cusson.** *Structural performance of some special concrete.* Fourth international symposium on the utilization of high strength / high performance concrete. Mai 1996. pp. 787-796 .
- [105] - **Aitcin, P.C, Neville, A et Acker, P.** *Les différents types de retrait du béton.* LCPC . mai-juin 1998. pp. . 41-51, bulletin, réf. 4184.
- [106] - **Gram, H et Piiparinen, P.** *Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance.* Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), . Stockholm, Sweden : s.n., septembre 1999. pp. 211-225, 13-15 .
- [107] - **Turcry, P.** *Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation.* Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes. 2004. thèse de doctorat.
- [108] - **Hu, C et Barbieri, B.** *Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d'un béton fluide traditionnel.* Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale. Toulouse : s.n., 5-6 mars 1998. pp. 265-272.
- [109] - **Persson, B.** *Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete.* Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), . Stockholm, Suède : s.n., 13-15 septembre 1999. pp. 239-250.
- [110] - **K, Sakata.** *Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete.* International Conference 2. Tronso, GB : CONSEC 98, 1998. pp. 2057-2064.
- [111] - **Sonebi, M et Bartos, P.J.M.** *Hardened SCC and its bond with reinforcement.* Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), . Stockholm, Sweden : s.n., 13-15 septembre 1999. pp. 275-289.
- [112] - **Neville, A.M.** *Propriétés des Bétons.* Sherbrooke, Canada : Paris Eyrolles , 2000.

-
- [113] - **HASNI, L.** *Bétons Autoplaçants*. Rapport de recherche n°98-004/98-006 du CEBTP présenté aux journées du PN BAP. juillet 1999.
- [114] - **Proust, E.** « *Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés*. INSA de Toulouse, . France : s.n., 2002. thèse de doctorat.
- [115] - **Mortsel, L.E et Rodum , E.** *Mechanical and durability aspects of SCC for road structures*”,. Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete. Tokyo, Japon : s.n., 23-25 octobre 2001. pp. 459-468.
- [116] - **Vieira, M et Bettencourt, A.** *Deformability of hardened SCC*. Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33). Reykjavik, Iceland : s.n., 17-20 août 2003. pp. 637-644.
- [117] - **Persson, B.** *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete*. s.l. : Cement and Concrete Research, 2000. pp. 193-198. Vol. 31.
- [118] - **Acker, P.** *Sur les origines du retrait et du fluage du béton*. s.l. : Revue française de génie civil, 2003. pp. 761-776. Vol. 7.
- [119] - **Alcocer, Catherine, et al.** *bétons autoplaçants : Monographie d'ouvrages en BAP*. Collection technique cimbéton. Paris : s.n. p. 142.
- [120] - **Hwang, S.D.** *Performance des bétons autoplaçants développés pour la réparation des infrastructures*. Université de Sherbrooke. Canada : s.n., 2006. p. 347, thèse de doctorat.
- [121] - **Lepesqueux, Étienne.** *comportement des bétons autoplaçants préparés avec des granulats légers*. canada : s.n., 2011. p. 125, thèse génie civil.
- [122] - **Khayat, K.H et Morin, R.** *Performance of self-consolidating concrete used to repair parapet wall in Montréal*. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. 2003. pp. 913-919
- [123] - **Pilon, Bernard.** *RÉPARATION DU TUNNEL NOTRE-DAME-DE-GRÂCE AU MOYEN DE BÉTON AUTOPLAÇANT*. Ministère des Transports du Québec. 2003. p. 11.
- [124] - **Abbadie, H, et al.** *La maîtrise esthétique des parements en béton*. COLLECTION TECHNIQUE CIMBÉTON. Paris : s.n. p. 87.
- [125] - **Khayat, K.H.** *Rehabilitation strategies and material performance of SCC used for the repair of the Jarry/Querbes underpass in Montréal*. International Conférence on Concrete Repair, rehabilitation and Retrofitting. , South Africa : s.n., 2005.
- [126] - **Assie, Stéphane.** *Durabilité des bétons autoplaçants*. Institut national des sciences appliquées de Toulouse. 29 octobre 2004. thèse de doctorat.