

CHAPITRE I

LE BETON AUTOPLAÇANT : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I- LE BETON AUTOPLAÇANT : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

Pour construire des structures durables et fiables, il est nécessaire non seulement de développer un béton de qualité, mais aussi d'assurer une mise en place correcte afin de répondre aux exigences demandées pour la mise en service de la structure.

Les structures actuelles se caractérisent par la complexité de leurs modèles telles que les formes variables et les courbures multiples, ainsi que par leur forte concentration en armatures, ce qui rend l'application des bétons usuels à ces types d'ouvrages très difficile avec des défaillances structurales très probables. Pour palier à cette difficulté un autre type de béton a vu le jour : c'est le béton auto-plaçant.

Dans cette synthèse, les récentes notions des bétons auto-plaçants seront traitées, les différentes approches de formulation seront illustrées, celle d'origine élaborée par les Japonais et les autres, quelques études récentes seront énoncées avec quelques formulations des bétons auto-plaçants puis commentées.

2. LE BETON AUTOPLAÇANT

2.1. DÉFINITION

Les bétons auto-plaçants (BAP), ou bétons auto-compactants ou encore 'Self Consolidating Concrete' (SCC) [Jakob 2000], sont des bétons fluides, très déformables, homogènes et stables, qui se mettent en place par gravitation et sans l'utilisation de moyens de vibration, ils épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, selon le cahier de charge qui leur est spécifique, ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique.

Les bétons auto-plaçants constituent une nouvelle génération de matériaux. Ils se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité [Khayat 2004].

Divers avantages sont avancés comme arguments pour l'utilisation du béton auto-plaçant. L'énumération ci-après n'est pas exhaustive [Jakob 2000] :

- Béton de qualité plus uniforme sur l'ensemble de la section.
- Qualité de béton supérieure, permettant de réduire les dimensions de l'élément de construction.

- Mise en place sans problème dans des formes de coffrage compliquées ainsi qu'en présence d'armatures denses.
- Rendements élevés à la mise en place.
- Moins de nuisances sonores.
- Durée de construction plus courte.

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par leurs propriétés à l'état frais [AFGC 2000], puisqu'ils puissent se mettre en place par leur propre poids, sans intervention extérieure, dans des coffrages aussi confinés qu'ils soient, ils restent homogènes au cours de l'écoulement sans présence de ségrégation une fois sur place [Sedran 1999].

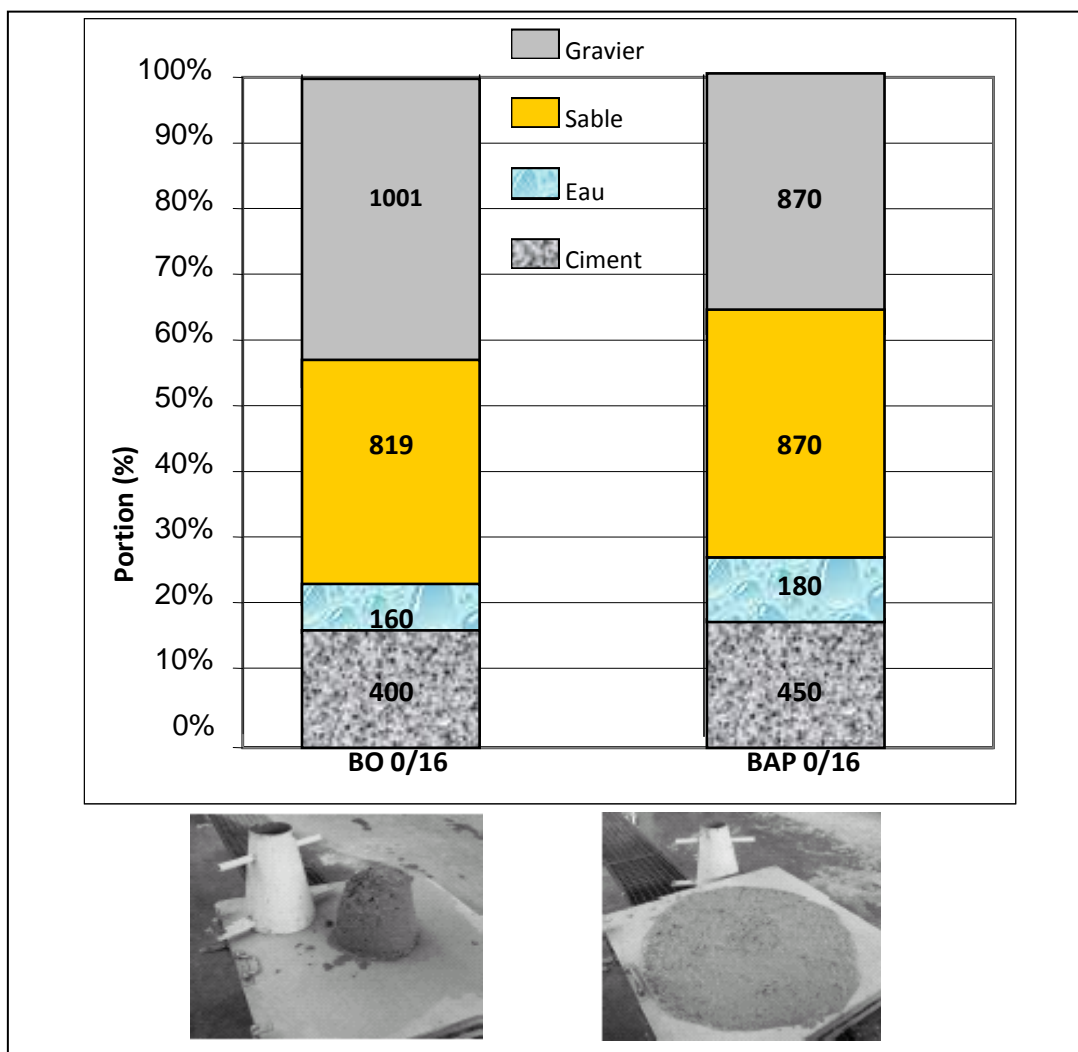


Figure 1. 1: Constituants d'un béton ordinaire et d'un béton autoplaçant

Pour les raisons évoquées, les bétons autoplaçants sont formulés différemment des bétons ordinaires, puisqu'en plus du ciment, du sable et de l'eau, ils doivent obligatoirement

contenir des quantités appréciables de fines (notamment minérales), de graviers, de fluidifiant et éventuellement d'un agent de viscosité [AFGC 2000].

(La figure 1. 1) montre à l'échelle que les composants de base des BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différents [Gibbs 1999].

Le nombre de constituants des deux bétons n'est pas le même, on constate nettement que le béton autoplaçant nécessite plus d'éléments, alors que la pâte (ciment +eau) est la même. Le rôle de la pâte est de séparer les granulats pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés et éviter ainsi la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement [Turcky 2004].

L'importante quantité d'éléments fins permet de garantir le compromis entre la stabilité et la maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité, il est nécessaire d'ajouter aux bétons un floculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Pour empêcher la ségrégation, il est nécessaire d'avoir recours aux agents de viscosité.

2.2. FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Pour les bétons ordinaires, la formulation consiste à trouver les quantités nécessaires de matériaux à combiner, pour fabriquer un béton répondant à certains critères qui se résument en général, en sa consistance et en ses résistances mécaniques. Pour y parvenir, les chercheurs utilisent les formules classiques de Dreux-Gorisse.

La formulation des bétons autoplaçants est plus complexe [Turcky 2004], puisque d'une part, il y a plus de matériaux à manipuler : le nombre minimal des constituants est de six, au lieu de quatre pour les bétons ordinaires, et d'autre part, des caractéristiques à l'état frais sont exigés et nécessitent des essais spécifiques à réaliser au préalable.

La production des bétons autoplaçants nécessite l'usage simultané d'un réducteur d'eau et d'un agent colloïdal pour obtenir une bonne stabilité tout en ayant une bonne fluidité. Non seulement il améliore la déformabilité de la pâte mais l'agent colloïdal assure aussi la stabilité du béton frais, ce qui prévient le saignement et la ségrégation du béton dû à une teneur en eau et en superplastifiant élevées [Tagnit-Hamou 2004].

2.3. METHODES DE FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS

Les formules des bétons autoplaçants ne sont pas standards, pour chaque étude, plusieurs combinaisons de constituants sont étudiées, basées en général sur des concepts empiriques. La méthode classique de Dreux-Gorisse ne gère que les quantités de granulats à utiliser.

Les caractéristiques à l'état frais exigées pour l'élaboration d'un béton autoplaçant ont pu être satisfaites grâce aux multiples expériences des chercheurs, débutées aux laboratoires puis engagées à échelle industrielle dans les pays en avance dans le domaine.

Dans ce qui suit, on présente les principales méthodes utilisées pour la formulation des bétons autoplaçants.

2.3 1- Méthode Japonaise

Ce sont Okamura et al en 1995 [Okamura 2004] qui ont eu l'initiation en proposant cette méthode, elle fut revue et amélioré par Ouchi et al en 1997. Cette méthode est fondée sur le principe de la formulation du mortier du béton en premier lieu, le mortier contenant une quantité de sable initialement arbitraire, on cherchera ensuite expérimentalement les proportions d'eau et de superplastifiant, le liant étant formé de ciment et d'addition minérale. La méthode se résume comme suit :

- La proportion volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide.
- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total du mortier.
- L'optimisation de la pâte se fait sur mortier contenant une proportion de 40% de sable.
- Les dosages en eau, en superplastifiant et en fines sont définis après ajustement pour les mortiers, de la viscosité (par essais de mesure des temps d'écoulement par entonnoir) et des fluidités suffisantes définies par les essais d'étalement au cône d'Abrams.

Cette méthode a été révisée puis utilisée par Ouchi et al [Ouchi 1999].

2.3 2- Méthode basée sur l'optimisation du volume de la pâte

Le principe de cette méthode consiste à considérer le béton comme un mélange composé de deux phases, une phase solide constituée des granulats, et une phase liquide formée de la pâte, c'est en effet le cas des bétons autoplaçants.

C'est Oh et al [Oh 1999] qui ont développé cette méthode, ils proposent de déterminer la quantité de pâte en excès à optimiser pour pouvoir obtenir un béton autoplaçant fluide, tout en évitant le phénomène de blocage, ce phénomène est décrit par la Figure 1.2.

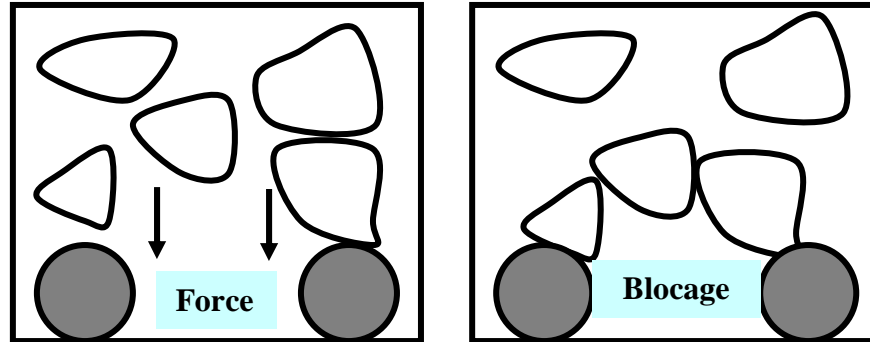


Figure 1.2 : Phénomène de blocage des granulats

La viscosité du mortier pourrait éviter le blocage aux granulats au droit des armatures.

L'expression du risque de blocage selon Tangtermisirikul et al [Tangtermisikul 1995] est donnée par la relation suivante:

$$R_b = (1 - V_p) \sum (Y_i / V_{crit,i}) \quad (1.1)$$

Avec: R_b : risque de blocage.

V_p : proportion volumique de la pâte dans le béton.

Y_i : proportion volumique des grains de dimension d_i par rapport au volume total des grains.

$V_{crit,i}$: volume partiel des grains de dimension i provoquant le blocage.

Pour une valeur du risque de blocage R_b inférieure ou égale à 1, il y a risque de blocage.

Pour la valeur limite de $R_b = 1$, on détermine pour chaque rapport granulats/sable (G/S), la teneur minimale de la pâte pouvant éviter le blocage.

2.3 3- Méthode dite Suédoise

Proposée par Petersson et al en 1996 [Petersson 1999], cette méthode est une approche similaire à la précédente. Elle consiste à déterminer expérimentalement, en se basant sur l'équation donnant R_b , le volume minimal de la pâte vis à vis de la fluidité et du volume critique de la pâte induisant le blocage. Les quantités de fines, d'eau et de superplastifiant sont

ajustées pour obtenir une viscosité suffisante pour un faible seuil de cisaillement et une résistance à la compression visée.

2.3 4- Méthode dite Française (LCPC)

Proposée par De Larrard et al en 1994 [De larrard 2000]. Les auteurs de cette méthode ont développé un modèle mathématique, basée sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange et ce selon la procédure suivante :

- La proportion du liant étant fixée (exemple : 70% de ciment et 30% d'addition).
- Le dosage en superplastifiant est pris égal à la moitié de celui de la saturation pour une viscosité élevée.
- Le besoin en eau de ce mélange avec superplastifiant déterminé.
- Le reste du calcul se fait par logiciel (BétonPro2) en tenant compte de l'effet de paroi.

2.3 5- Méthode basée sur les plans d'expérience

Le nombre de constituants dans la composition des bétons autoplaçants étant élevé, les plans d'expériences permettent de gérer l'influence de chaque paramètre de cette composition. Ceci dans le but de manipuler moins de quantités de gâchis et obtenir des résultats satisfaisants.

Il est à signaler que pour l'instant, le domaine de la recherche sur les méthodes de formulation des bétons autoplaçants reste ouvert, du moment qu'il n'existe pas de formulation généralisée, comme peut l'être la méthode de Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires.

2.4. EXEMPLES DE FORMULATIONS

La formulation se fait par tâtonnement en considérant au départ des plages de valeurs dans lesquelles chaque constituant varie. Certains formulateurs ont certes développé leurs propres outils, ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes [Turcky 2004].

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton au lieu du laboratoire. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile en centrale à béton par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. C'est ce qui explique dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Un ensemble de formulations illustrées dans la littérature seront présentées à titre d'exemples dans les tableaux ci-dessous (Tableaux 1.1 à 1.4).

Dans les formulations illustrées, des fines minérales ont été utilisées, deux à la fois (laitier et cendre volante, cas des deux premières formulations), pour la troisième formulation un seul ajout minéral a été utilisé; alors que pour les trois formulations, le rapport Eau/Liant avoisine le (0.34).

Tableau 1.1 : Exemples de formulations Japonaises [Turcky 2004].

Auteurs du Béton	Ciment Kg/m ³	Laitier Kg/m ³	Cendre volante Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravillon Kg/m ³	Eau Kg/m ³	Super-plastifiant Kg/m ³	Agent viscosité Kg/m ³
[Nakataki et al, 1995]	200	200	100	0	704	898	165	6	0
[Hayakawa et al, 1995]	180	220	100	0	753	926	170	7.7	1.5
[Yurugi et al, 1992]	300	0	0	200	700	910	170	8	0.2

Tableau 1.2 : Exemples de formulations canadiennes [Beaupré et al, 1999]

Gâchée	Ciment Kg/m ³	Fumée de silice Kg/m ³	Gravillons Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Eau Kg/m ³	A V g/m ³	E A l/m ³	SP l/m ³
M35-SF	563	18	854	709	203	436	-	25.3
M35-A	581	-	853	682	203	436	1.0	23.2
M35-SF-A	563	18	825	680	203	436	1.0	25.3
M38-A	589	-	875	790	224	436	0.8	11.8
M38-SF-A	563	18	810	670	220	436	1.0	11.3
M41-SF	563	18	809	674	238	436	-	07.6
M41-Sf-A	563	18	775	650	238	436	0.8	07,6

Avec : AV : agent de viscosité, EA : entraîneur d'air et SP : superplastifiant.

Tableau 1.3 : Composition du béton autoplaçant et de sa pâte [Naadia 2004]

Désignation	Unité	Béton autoplaçant	Pâte	Observations
Eau efficace	Kg	170	170	
Ciment	Kg	350	350	SSB = 4200 cm ² /g Mv = 3120 kg/m ³ et d50= 15µm
Sable (0/4 mm)	Kg	860	/	Mv = 2620 kg/m ³ Absorption (Abs = 1.2%)
Gravier (4/10 mm)	Kg	840	/	Mv = 2670 kg/m ³ Absorption (Abs = 1%)
Filler calcaire	Kg	150	150	SSB = 4000 cm ² /g Mv = 2698 kg/m ³ et d50= 15µm
Superplastifiant	Kg	2.38	2.38	Densité (d=1.084) Extrait sec (Es=34%) Sp/C = 0.68 % en masse
E efficace / C	/	0.486	0.486	
E efficace / L	/	0.34	0.34	
Air occlus théorique	%	1.7	/	
Masse volumique Apparente théorique	Kg/m ³	2372	1987	

Tableau 1.4 : Exemples de formulations Françaises [Sedran, 1999]

Gâchée	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
315	451	59	557	299	858	182.7	6.98
316	385	120	563	302	867	174.0	6.24
317	312	186	566	304	872	169.2	5.38
329	480	0	568	305	918	166.1	7.20
321	475	0	562	302	909	174.4	7.13
318	470	0	556	299	900	182.6	7.06

Nous retenons de ces exemples que dans toutes les formulations illustrées, les superplastifiants ont été utilisés, alors que dans certaines, l'agent de viscosité n'a pas été incorporé (cas des formulations françaises). *Cela veut dire qu'il est possible de fabriquer des bétons autoplaçants sans intégrer des agents de viscosités dans leurs formulations.*

2.5. CAPACITE DE REMPLISSAGE :

Les bétons autoplaçants qui sont très fluides, se mettent en place par effet de leurs propres poids et sans vibration, ont une aptitude à remplir les coffrages les plus densément armés sans intervention extérieure ; cette caractéristique est communément appelée **capacité de remplissage**. Cette capacité dépendrait de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation. La capacité de remplissage des bétons autoplaçants pourrait être maximale pour une déformabilité maximale et pour une ségrégation faible, celle-ci dépendrait uniquement de la quantité de l'eau [Ozawa 1991].

[Miura 1993] et [Umehara 1994] ont montré que la résistance à la ségrégation dépend essentiellement de la viscosité du mortier les composant et du volume des gros grains. Une augmentation de la viscosité minimiserait donc la ségrégation. La composition des bétons autoplaçants doit donc contenir des constituants supplémentaires en dosages différents par rapport aux bétons ordinairement conçus et vibrés.

En conséquence de ce qui a été cité précédemment, on peut dire qu'un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait à des propriétés relatives à sa fluidité et à sa résistance à la ségrégation, ces caractéristiques seraient donc suffisantes à elles seules, si elles sont vérifiées, à définir un béton autoplaçant. Le tableau 1.5 montre les modifications à mener sur la

formulation pour corriger ces propriétés, pour pouvoir obtenir un béton aux propriétés autoplaçantes.

Tableau 1.5 : Correction des propriétés d’ouvrabilité des BAP

Propriétés d’un BAP	Moyens d’obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation de superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la Ségrégation	Réduction de l’eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux fins
		Utilisation d’agents de viscosité
	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d’agents de viscosité
Réduction de la taille maximale		
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

On constate bien que la pâte est la partie la plus importante que comporte un BAP, cela veut aussi dire que pour qu’un béton soit autoplaçant, il faut que la pâte soit autoplaçante, son volume serait plus élevé que celle d’un béton vibré.

2.6. COMPOSITION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

De nombreuses études de recherche ont été menées pour aboutir à une formulation appropriée des BAP. Ces bétons se composent particulièrement d’un volume de fines assez important par rapport aux bétons ordinaires et nécessitent un agent de viscosité.

En plus du ciment qui est choisi en fonction de sa disponibilité et des résistances mécaniques désirées et de l’eau, les bétons autoplaçants se composent des granulats, des fines (qui peuvent être combinées à des additions minérales), d’un fluidifiant et d’un agent de viscosité. Le mélange de ciment (avec ou sans addition) et d’eau constitue « la pâte de ciment », en ajoutant du sable on obtient un « mortier », en additionnant du sable et des granulats de diamètres supérieures on obtient « un béton ». La pâte joue un double rôle dans le béton, elle représente un liant entre les granulats et remplit les pores inter-granulaires.

C'est l'élément actif des composants du béton, elle représente environ 30% de son volume [Andriam 2004]. Les granulats constituent un squelette inerte dispersé dans la pâte. La présence des granulats dans le mélange limite la propagation des fissures de la pâte dues aux retraites. Le tableau 1.6 présente quelques types de bétons qui sont actuellement à la disposition des constructeurs :

Tableau 1.6: Les différents types de bétons [Andriam 2004]

Type de béton	Composition		Caractéristiques
Béton Ordinaire BO	Eau + ciment + granulats	E / C ≈ 0.5 à 0.6	20 MPa ≤ F _{c28} ≤ 50 MPa
Béton Hautes Performances BHP	Eau + ciment + granulats + adjuvant réducteur d'eau	0.35 ≤ E / C ≤ 0.40	50 MPa ≤ F _{c28} ≤ 80 MPa
Béton Très Hautes Performances BTHP	Eau + ciment + granulats + superplastifiant réducteur d'eau + fumée de silice	0.20 ≤ E / C ≤ 0.35	80 MPa ≤ F _{c28} ≤ 150MPa
Béton Auto-plaçant BAP	Eau + ciment + granulats + fines (calcaires ou actives) + superplastifiant + agent de viscosité	G / C ≈ 1	Béton très fluide, homogène et stable, mis en place dans les coffrages par le seul effet de la gravité et sans aucun procédé de serrage.

Les BAP contiennent un volume important de pâte (de l'ordre de 330 à 400 l/m³) et une quantité de fines (< 60µm) supérieure à celle des bétons ordinaires (environ 500 kg/m³), obtenue en abaissant la proportion volumique des gravillons tout en maintenant le rapport gravillons / sable voisin de l'unité. Ce type de béton est généralement utilisé pour des réalisations verticales (murs en voile et poteaux), pour des applications horizontales (planchers et dalles), on utilise les bétons autonivellants (BAN) qui sont des dérivés des BAP.

2.6. 1- Les granulats

Les granulats proviennent en général des roches naturelles, ils peuvent être concassés ou roulés, leur utilisation dans la confection des bétons est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [Andriam 04]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent considérablement sur le comportement du béton à l'état frais.

La dimension de ces granulats varie d'un dixième à plusieurs dizaines de millimètre. La norme française **XP P 18 – 450** donne une définition plus précise des principales divisions granulométriques des granulats :

- Sable 0/ D avec $1\text{mm} < D \leq 6.3$.
- Gravillons d/ D avec $d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$.
- Grave 0/ D avec $D > 6.3$.

Pour le cas particulier des bétons autoplaçants, l'AFGC préconise un diamètre maximal allant jusqu'à 20 mm. Par ailleurs, les formulations rencontrées durant notre recherche bibliographique, se font avec des granulats de diamètres maximaux variant entre 12.5 et 15 mm (Cf Tableaux I.1 à I.6).

2.6. 2- Les fines

Selon notre analyse de la littérature, nous avons constaté que l'ensemble des formulations des bétons autoplaçants, des fines d'origines minérales actives ou inertes ont été incorporé à quantités considérables.

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage par rapport au béton vibré. Pour obtenir ces propriétés et pour un meilleur arrangement granulaire, on ajoute de fortes teneurs en additions minérales : cendres volantes, fumées de silice, laitiers, additions (fillers) calcaires.

En effet, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer la compacité du béton. Ceci donne à la fois une bonne stabilité et une bonne déformabilité du béton à l'état frais. D'autre part, les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. Ils ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation.

2.6. 3- Le superplastifiant

On distingue essentiellement des adjuvants accélérateurs ou retardateurs de prise, les adjuvants réducteurs d'eau (plastifiant) et hauts réducteurs d'eau (superplastifiant ou fluidifiant), selon les normes en vigueur, le dosage en adjuvant n'excède pas les 5% de la masse du ciment.

Les adjuvants réducteurs d'eau et hauts réducteurs d'eau, comme leur nom l'indique, permettent de diminuer la quantité d'eau de gâchage tout en ayant une bonne maniabilité du béton à l'état frais lors de sa mise en œuvre. Les fluidifiants sont des macromolécules de composition organique de synthèse et ont une propriété dispersante [Andriam 04]. Ils agissent de deux manières différentes : soit en s'adsorbant sur les particules de ciment, ils réduisent les forces d'attraction inter granulaires en créant des forces de répulsion; soit en augmentant la fluidité du mélange par dispersion des grains solides.

La réduction d'eau et l'ouvrabilité fournies par l'usage des superplastifiants ont permis le développement de bétons à hautes et très hautes performances. Les agents réducteurs d'eau ordinaires tels que les lignosulfonâtes sont utilisés dans des bétons ayant un rapport eau – ciment de 0.40 ou plus. Quant une réduction d'eau plus élevée est exigée, l'usage de superplastifiants est approprié. Les polymères synthétiques sont les plus efficaces pour ce but. Les produits à base de poly-naphtalène sulfonâtes et poly-mélanine sulfonâtes sont les plus utilisés ; ils peuvent accomplir jusqu'à 30% de réduction d'eau [Tagnit-Hamou 2004].

Une nouvelle génération de superplastifiants à base de poly-acrylates a été récemment développée, pouvant accomplir les mêmes réductions d'eau avec des dosages inférieurs aux antécédents, mais avec des corrections adéquates pour diminuer quelques effets indésirables tels qu'un entraînement excessif d'air ou retard flagrant de prise.

2.6. 4- L'agent de viscosité

Généralement, les superplastifiants diminuent la viscosité du béton [Umehara 1994], ce qui rend le matériau plus sensible vis à vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés.

La production des bétons autoplaçants peut être faite par l'usage simultané d'un réducteur d'eau et d'un agent colloïdal pour obtenir une bonne stabilité tout en ayant une bonne fluidité, non seulement il améliore la déformabilité de la pâte mais il assure aussi la stabilité du béton frais, ce qui prévient le saignement et la ségrégation du béton dû à une

teneur en eau et en superplastifiant élevées. Le réducteur d'eau et l'agent colloïdal doivent être aussi compatible que possible afin d'éviter des effets secondaires indésirables.

L'utilisation des cendres volantes et de laitier diminue la demande en eau du béton [Tagnit-Hamou 2004], ce qui diminue le dosage en superplastifiant utilisé et par conséquent la quantité d'agent colloïdal nécessaire. Le coût du béton produit est alors moins élevé que celui d'un béton fait avec du ciment seul. Bien que les bétons avec 20% de cendres volantes ou 40% de laitier aient une faible résistance à la compression au jeune âge, leurs performances à long terme sont excellentes, surtout concernant l'aspect de la durabilité [Tagnit-Hamou 2004].

Quelques chercheurs étudiant l'importance de l'incorporation de l'agent de viscosité tel que [Ambroise 1997], montrent que :

- Lorsqu'aucun agent de viscosité n'est utilisé, il faut environ 600 kg/m^3 de fines (ciment + cendres ou calcaire) pour assurer une bonne rétention d'eau.
- Lorsqu'on introduit un agent de viscosité, on peut baisser ce dosage à 400 kg/m^3 voir 350 kg/m^3 si l'on utilise des produits spéciaux.

Il serait donc judicieux de pouvoir choisir entre l'utilisation d'un agent de viscosité baissant le dosage en fines ou *se contenter d'utiliser le volume nécessaire de ces fines répondant aux exigences des essais et ne pas s'encombrer d'un autre paramètre de composition*, c'est le cas d'un travail de valorisation de matériaux locaux où l'on tente d'élaborer un béton autoplaçant sans avoir recours à utiliser un agent de viscosité.

2.7. ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP

A l'état frais, les bétons autoplaçants doivent concilier deux propriétés à priori contradictoires, à savoir, la fluidité et les non ségrégation et ressuage. A cet effet, pour être qualifiés d'autoplaçants, ces bétons doivent satisfaire à quelques tests spécifiques préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil (AFGC), ses recommandations qui étaient provisoires, sont devenus des essais de référence pour valider une formule de BAP [AFGC 2000].

2.7. 1- Essai d'étalement

C'est le plus simple et le plus largement utilisé pour la caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais [Kuroiwa 1993, EFNARC 2002 et Bartos 2002].

Inspiré de l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrahms, cet essai caractérise la capacité d'un BAP à se placer par son propre poids sans intervention externe dans un milieu non confiné. Au lieu de mesurer l'affaissement, on mesure le diamètre moyen de la galette formé par le béton lors de l'étalement (Figure 1.3). On vise habituellement un étalement compris entre 600 et 750 mm pour un béton autoplaçant, ce diamètre serait proportionnel au seuil de cisaillement du béton [AFGC 2000]. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm afin d'y mesurer le temps de passage de la galette par ce diamètre, la valeur mesurée serait significative. La mesure du temps de passage de la galette de béton par le diamètre de 50 cm, noté T_{50} caractérise qualitativement la vitesse de déformation du béton. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes, Certains auteurs considèrent que cette valeur peut atteindre 12 secondes pour des bétons autoplaçants ayant une faible vitesse de déformation [El Barrak 2005].

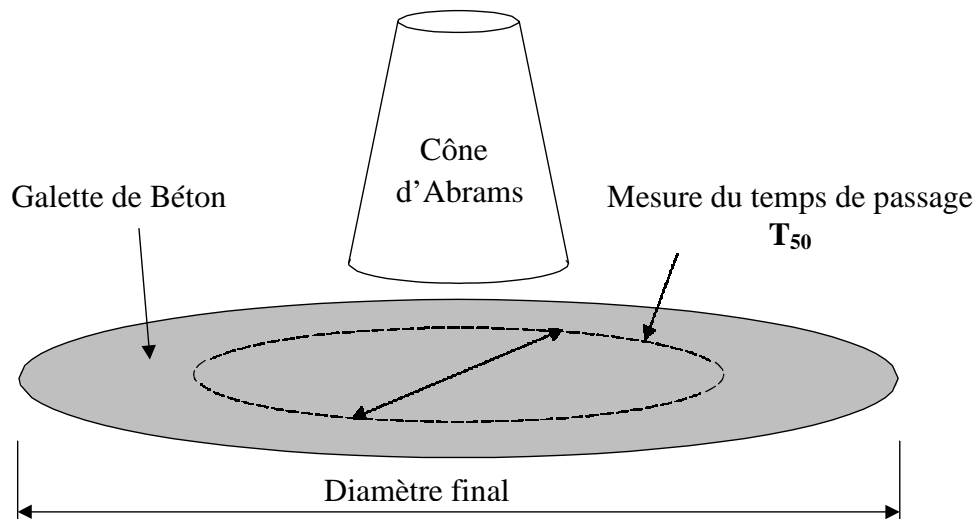


Figure 1.3. Essai d'étalement pour les BAP.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

2.7. 2- Essai de la boîte en L

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

Lors de l'essai, on remplit d'abord la partie verticale de la boîte en forme de L (Figure 1.4). Après une minute, la trappe est levée permettant ainsi l'écoulement horizontal du béton à travers trois armatures de diamètre 14 mm chacune et distantes de 39 mm. Le taux de remplissage final $H2/H1$ nous renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné, les dimensions $H1$ et $H2$ sont mesurées lorsque le béton se stabilise dans la boîte et ne s'écoule plus, ce taux doit être au moins égal à 0.8 pour que le béton soit qualifié d'autoplaçant [AFGC 2000].

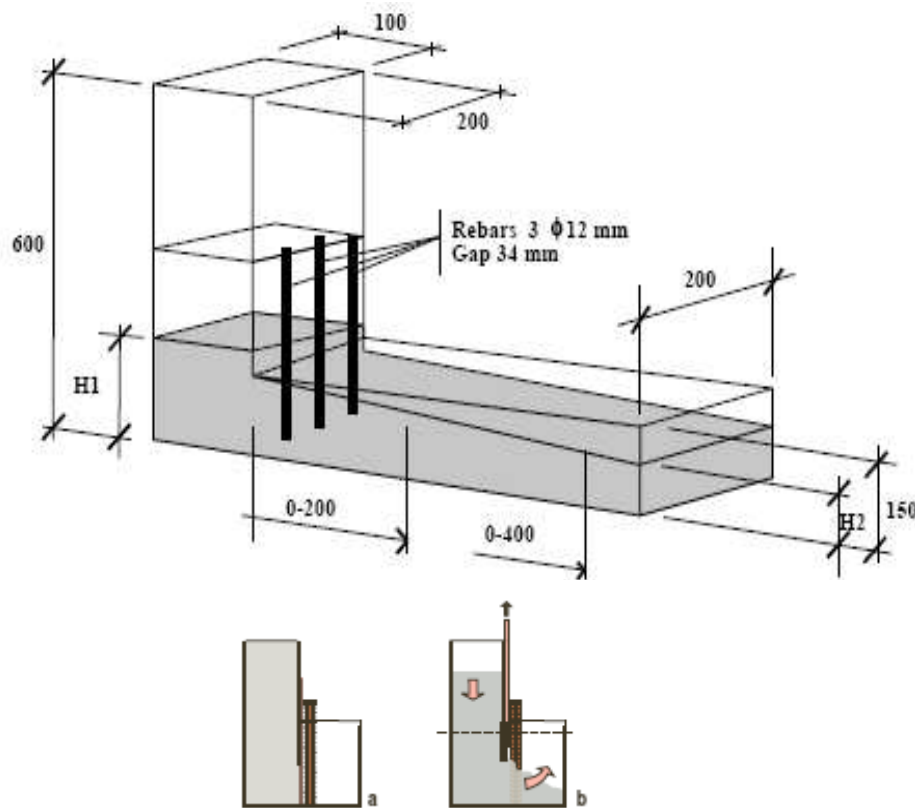


Figure 1.4. Essai de la boîte en L.

Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation. La vitesse de l'écoulement peut être évaluée en mesurant le temps de passage du béton à la ligne des 20 cm et à celle des 40 cm. Les temps de passage sont respectivement notés T_{20} et T_{40} . Certains auteurs [El Barrak 2005] recommandent des valeurs inférieures à 1,5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3,5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant, alors qu'elle peut osciller entre 2 et 7 secondes pour le T_{50} [Eric2003].

2.7. 3- Essai de stabilité au tamis

Avec cet essai, la ségrégation des BAP est testée. A cet effet, après malaxage, deux litres de béton sont versés dans un seau. Après quinze minutes de repos, 4.8 kg de béton sont versés du seau sur un tamis de maille 5mm (Figure 1.5). Deux minutes plus tard, on pèse la quantité passante (laitance) ayant effectivement traversé les mailles du tamis. Cette quantité rapportée à la masse initiale donne l'indice de ségrégation. Un pourcentage élevé de laitance indique une faible résistance à la ségrégation. Ce pourcentage doit être au plus égal à 15 % [AFGC 2000].

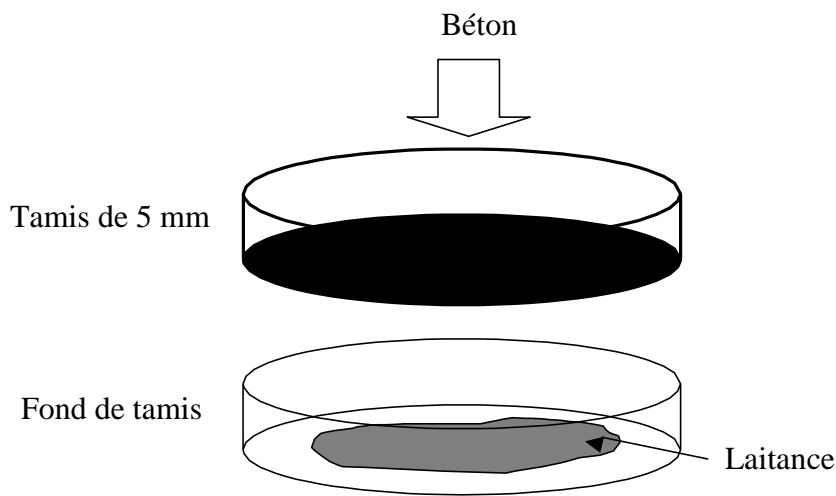


Figure 1.5. Essai de stabilité au tamis.

Le pourcentage (**P**) de laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon peut être calculé par [AFGC 2000] :

$$P = 100 \times (\text{Masse de laitance}) / (\text{Masse de l'échantillon}) \quad (1. 2)$$

La mesure de pourcentage nous mène à classer les formulations de bétons autoplaçants de la façon suivante (Tableau 1.7) [AFGC 2000].

Tableau 1.7 : Critères de stabilité à la ségrégation des BAP

Conditions	Critères de stabilité	Remarques
P = 0 à 15%	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
P = 15 à 30%	Stabilité critique	Vérifier les autres critères de stabilité
P au-delà de 30%	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

Le Tableau 1.8 résume les valeurs du diamètre d'étalement (pour l'essai d'étalement au cône d'Abrams), du rapport H2 / H1 (pour l'essai de la boîte en L) et du pourcentage de la laitance (pour l'essai de stabilité au tamis) préconisées par l'AFGC, ces trois essais à eux seuls peuvent définir le caractère autoplaçant des bétons étudiés [AFGC 2000].

Tableau 1.8 : Valeurs préconisées par l'AFGC

Étalement	60 à 75 cm
H2 / H1	≥ 0.8
Laitance	$\leq 15\%$

2.7. 4- Essai J-Ring

L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abrams. Le cône d'Abrams est d'abord posé au centre de l'anneau d'armatures avant d'être relevé pour observer l'étalement du béton à travers les armatures (Figure 1.6). Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre celles-ci sont différentes selon les auteurs et les pays. A titre d'exemple, Nous citons quelques dimensions rapportées par [Daczko 2003]:

Les diamètres des armatures et les espacements entre armatures peuvent varier respectivement dans les plages 10-16 mm et 34-48 mm. Le diamètre de l'anneau varie entre 23,5 et 30 cm.

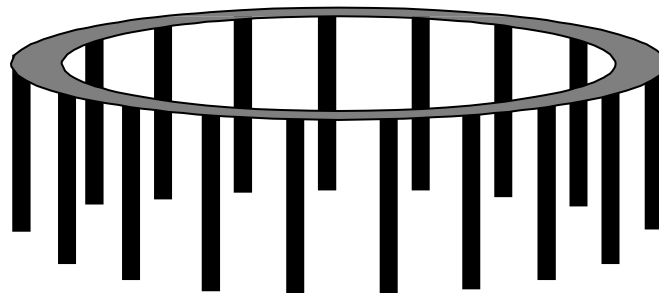


Figure 1.6 : Anneau d'armatures (J-Ring)

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué

deux fois, la seconde fois en utilisant l'anneau d'armatures. La différence entre les diamètres moyens des deux essais met en évidence la perte de remplissage due à la présence d'armatures. Pour un béton autoplaçant, cette différence doit être inférieure à 5 cm [El Barrak 2005]. Cet essai est essentiellement utilisé dans le cas des bétons autoplaçants fibrés.

2.7. 5- Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant [Sharendahl 2001], il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm et équipée d'une trappe (Figure 1.7).

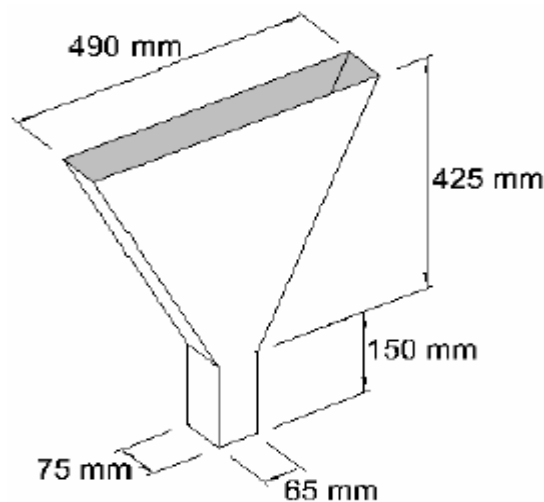


Figure 1.7 : Schématisation de l'essai de l'entonnoir (V-funnel)

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue [Sharendahl 2001].

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [El Barrak 2005].

Dans cet d'essai, On détermine la vitesse moyenne V_m d'écoulement durant le temps t_0 à travers l'entonnoir par la relation suivante (le temps t_0 est mesuré juste après remplissage de l'entonnoir) [Koch 2003].

$$V_m = [0.01 / (0.065 \times 0.075 \times t_0)] = 2.05 / t_0 \text{ (en m/s)} \quad (1.3)$$

Pour quantifier la résistance à la ségrégation, l'indice S_f de l'écoulement est calculé en fonction de t_0 et du temps t_5 de l'écoulement après 5 minutes passée au repos dans l'entonnoir par :

$$S_f = (t_5 - t_0) / t_0 \quad (1.4)$$

2.7. 6- Essai de l'écoulement au tube en U

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boîte en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton [Hayakawa 1993].

Le dispositif d'essai (Figure 1.8) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Pour un béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm [Hayakawa 1993].

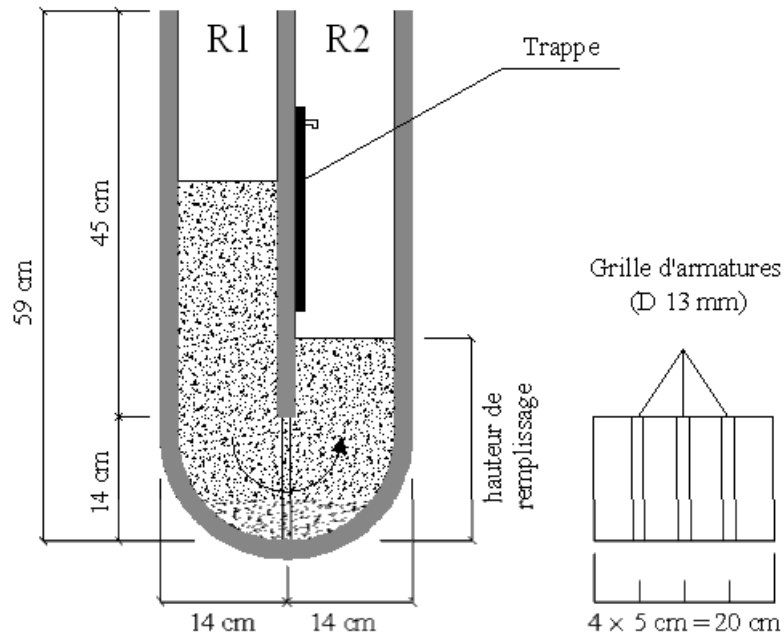


Figure 1.8 : Schématisation de l'essai du tube en U

2.7. 7- Essai de l'écoulement au caisson

Cet essai simule le comportement d'un béton dans un milieu fortement ferrillé, et consiste à évaluer le taux de remplissage dans ce milieu (Figure 1.9). Il est généralement destiné au test des bétons très fluides, ne contenant pas de gravier de taille supérieure à 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement autoplaçant du béton.

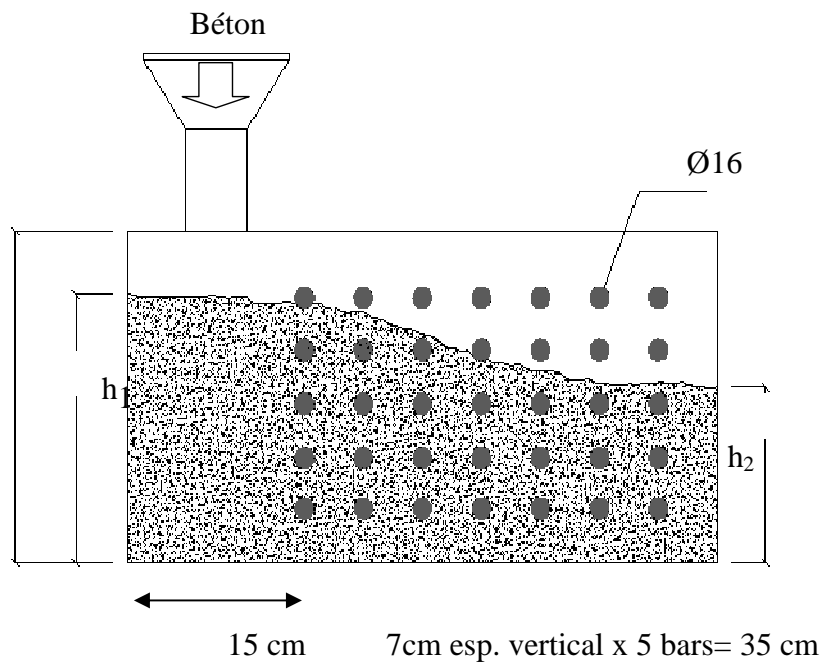


Figure 1.9: Schématisation de l'essai du caisson

Ce test consiste à verser le béton dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur h_1 des armatures supérieures (Figure I.9). Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement de la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage. Une caractérisation quantitative du taux de remplissage $R(\%)$ est possible par la relation suivante [Hayakawa 1993]:

$$R (\%) = \frac{h_1 - h_2}{2 \times h_1} \cdot 100 \quad (1.5)$$

Où h_1 et h_2 sont les hauteurs mesurées du béton (après l'arrêt de l'écoulement) de part et d'autre du caisson (Figure I.9). Pour un béton autoplaçant, le taux de remplissage au caisson doit être supérieur à 60% [Sedran 1995].

2.7. 8- Essai de la passoire

Cet essai consiste à observer le comportement du béton pendant son écoulement à travers une grille d'armatures espacées de 5 cm. Il permet de détecter les signes de blocage afin d'évaluer la capacité de passage du béton.

Le test (Figure 1.10) est réalisé avec un volume de 30 litres de béton, versé dans le récipient équipé dans sa partie inférieure de la grille d'armature. Le récipient est soulevé verticalement laissant le béton s'écouler à travers la grille. Une pression est exercée sur la surface supérieure de l'échantillon de béton afin de tester son comportement à différentes conditions d'écoulement (pression supérieure à celle de l'écoulement à l'essai au caisson) [Hayakawa 1993].

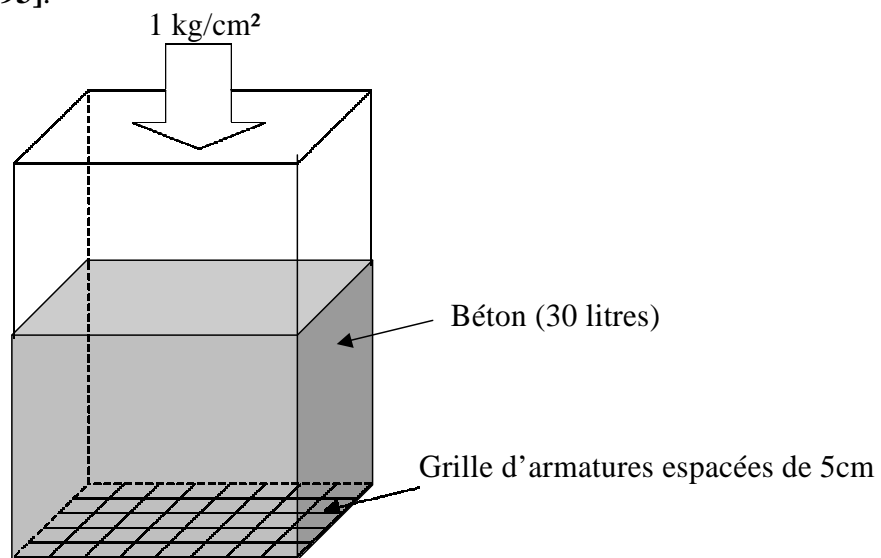


Figure 1.10 : Schématisation de l'essai de passoire

Cet essai est actuellement rarement utilisé puisqu'il nécessite un grand volume de béton, et un temps de mise en œuvre important [El Barrak 2005].

2.7. 9- Essai de la colonne

Cet essai, développé par Otsuki et al [Otsuki 1996], permet d'évaluer la résistance à la ségrégation d'un béton. Il consiste à placer le béton dans une colonne cylindrique (figure 1.11) ou à base carrée (10 cm de côté) et à le laisser jusqu'au début de prise. Des fractions des parties supérieure, centrale et inférieure sont lavées au travers d'un tamis de 5 mm et les granulats de taille supérieure à 5 mm sont pesés. La ségrégation est négligeable si la distribution des granulats dans les différentes parties est uniforme. La distribution est considérée comme uniforme si la différence entre les teneurs en graviers des parties supérieure et inférieure ne dépasse pas 10% [Otsuki 1996].

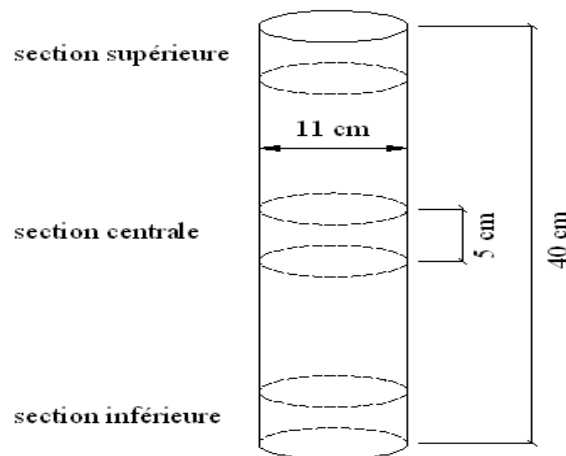


Figure 1.11 : Essai de la colonne

2.7. 10- Essai à la colonne « LMDC »

C'est une méthode développée au Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Construction de Toulouse LMDC [Reg 2005], pour quantifier la ségrégation statique d'un béton autoplaçant à l'état frais. Le dispositif d'essai est constitué de 7 tiroirs en Bakélite, de section 15cm x 15 cm, empilables les uns sur les autres pour former une colonne de 70 cm de hauteur. L'individualisation de chacun de ces tiroirs est possible par l'intermédiaire de tôles coulissantes (Figure 1.12). Il est alors possible de faire une analyse granulométrique du béton contenu dans chacun des tiroirs.

Le béton est versé dans la colonne dès la fin du malaxage. A l'échéance de 30 minutes

après la mise en place dans la colonne, les tôles sont poussées pour séparer les 7 parties depuis le tiroir supérieur jusqu'au tiroir inférieur. Après lavage (sur un tamis de 2,5 mm), une analyse granulométrique (à sec) est effectuée sur le squelette granulaire récupéré dans chaque tiroir.

Cet essai est très bien corrélé avec l'essai de stabilité au tamis (GTM) et le complète. En effet, il permet de vérifier si les différences de granulométrie entre les parties supérieures et inférieures sont graduelles ou brusques, en plus de l'éventuelle ségrégation se présentant entre les parties granulaires [El Barrak 2005].

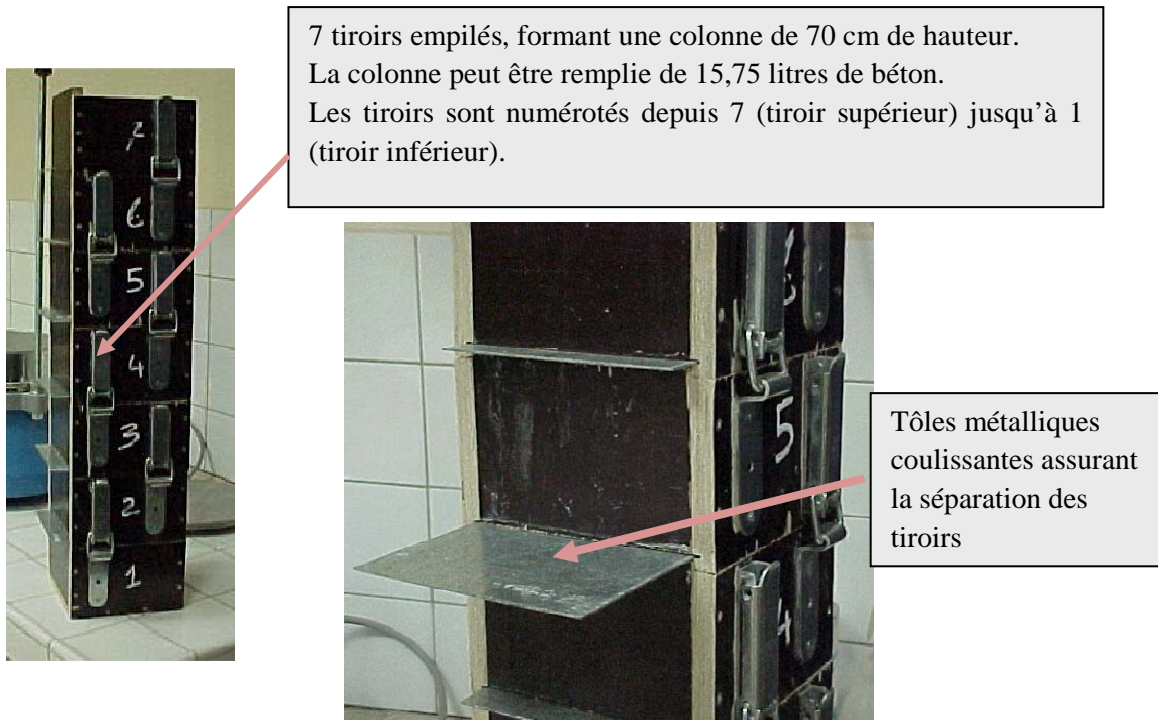


Figure 1.12 : Dispositif de l'essai de la colonne LMDC.

2.7. 11- Tests de pénétration

L'essai de pénétration à la bille (Figure 1.13) est un essai qui a pour objectif de tester la tendance à la ségrégation [Sedran 1999]. Il consiste à mesurer l'enfoncement d'une bille de 20 mm de diamètre, dans un cylindre de béton de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. La bille, qui simule un granulat de la même taille, est reliée par une tige rigide à un balancier et sa masse volumique peut être ajustée par un contre poids. Pour différents poids apparents, l'essai consiste à laisser la bille s'enfoncer de sa hauteur dans le béton. On mesure le temps nécessaire pour que la bille s'enfonce dans le béton. Plus ce temps est faible, plus la tendance à la ségrégation du béton est élevée. Pour un béton

autoplaçant, la résistance à la ségrégation est jugée satisfaisante si la bille s'enfonce d'une hauteur inférieure à 6 cm.

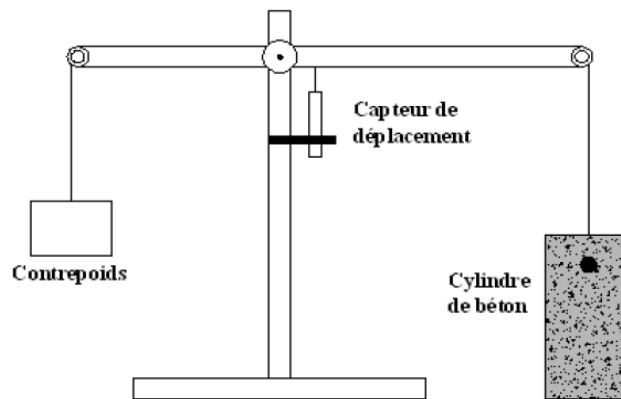


Figure 1.13 : Essai à la bille

2.8. BILAN

Les principaux tests empiriques utilisés dans différents laboratoires sont cités, ces essais sont destinés à caractériser en plus de l'ouvrabilité du béton autoplaçant, la fluidité, l'absence de blocage dans les milieux ferrillés et les risques de ségrégation. Le tableau 1.9 montre l'ensemble des tests avec les propriétés d'écoulement qu'ils peuvent mettre en évidence.

Tableau 1.9 : Caractérisation des bétons autoplaçants par les tests empiriques

Type d'essai	Capacité de remplissage	Vitesse de déformation	Résistance à la Ségrégation	Capacité de passage
Cône d'Abrams	X	X	X	
J-Ring	X			X
Entonnoir		X		X
Boite en L	X	X		X
Tube en U	X			X
Caisson	X			X
Passoire				X
Stabilité au tamis			X	
Colonne			X	
Colonne LMDC			X	
Pénétration			X	

L'essai de l'étalement au cône d'Abrams est plus utilisé, puisqu'à lui seul, il caractérise la capacité de remplissage, la vitesse de déformation et la résistance à la ségrégation. Combiné avec le test de la boîte en L, il peut servir à évaluer aussi la capacité de passage du béton autoplaçant à travers les mailles du ferrailage.

Cependant, la caractérisation de tous les aspects d'ouvrabilité d'un béton autoplaçant nécessite au moins deux ou trois essais. En effet, aucun essai ne peut caractériser toutes les propriétés d'ouvrabilité réunies d'un béton.

Enfin, il est possible qu'un test d'ouvrabilité empirique qualifie comme identiques, deux bétons qui ont des comportements différents dans d'autres circonstances. C'est le cas deux bétons ayant le même étalement par exemple, mais qui ne sont pas forcément de la même consistance et peuvent avoir deux valeurs distinctes de viscosité. Par conséquent, une caractérisation rhéologique quantitative est nécessaire pour décrire l'écoulement du béton.

3. ETUDES RHEOLOGIQUES

La rhéologie est l'étude des relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leurs dérivées par rapport au temps. Ces relations dites de comportement font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées [Assié 2004].

Le comportement rhéologique est la manière dont se déforme un élément de volume soumis à des contraintes imposées. La maîtrise du comportement rhéologique dans le cas du béton frais est primordiale afin d'obtenir une bonne adéquation entre le matériau et la méthode de mise en œuvre. Les termes comme l'ouvrabilité, la maniabilité, la consistance, la plasticité, sont utilisés pour décrire l'aptitude du béton à l'écoulement [Adriana 2004].

Les études rhéologiques des pâtes de ciment concernent principalement l'établissement des courbes d'écoulement et des paramètres rhéologiques des pâtes ou encore, à taux de cisaillement constant, du comportement rhéologique des pâtes en fonction du temps [Cyr 1999].

3.1 GRANDEURS RHÉOLOGIQUES. DÉFINITIONS :

a. Contrainte de cisaillement τ [Pa]:

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de contraintes qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche [Cyr 1999].

b. Vitesse de cisaillement γ [s^{-1}] :

Souvent appelée **gradient de vitesse**, c'est la vitesse de déformation de deux couches successives d'un matériau cisailé, elle représente la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement [Cyr 1999].

c. Seuil de cisaillement τ_0 [Pa] :

C'est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le fluide s'écoule. Pour des contraintes plus faibles, le corps ne présente pas de déformation permanente et il se comporte comme un solide [Cyr 1999].

Le seuil statique correspond à une contrainte appliquée qui provoque le premier signe d'écoulement du matériau (suspension) vierge de toute sollicitation, cette suspension étant initialement structurée. Pratiquement, ce seuil peut être obtenu en imposant une contrainte croissante jusqu'à la valeur provoquant le premier écoulement de la suspension.

Le seuil de cisaillement dynamique correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul. Il s'agit alors d'une valeur obtenue après la déstructuration du corps. La méthode de mesure consiste à déstructurer complètement la suspension testée en appliquant un gradient de vitesse suffisamment élevé, d'établir ensuite la courbe d'écoulement en faisant varier le gradient de vitesse, et de déduire la valeur de la contrainte à une valeur nulle du gradient de vitesse à partir de l'équation du modèle.

Par conséquent, la valeur du seuil de cisaillement statique est logiquement supérieure à celle du seuil de cisaillement dynamique, en raison de l'état de déstructuration de la matière cisailée [Cyr 1999].

d. Viscosité [Pa.s] :

Plusieurs types de coefficients de viscosité existent pour caractériser le comportement rhéologique des matériaux dont le principal est la viscosité dynamique ou apparente (μ),

définie par la relation suivante :

$$\mu = \tau / \gamma \quad (1.6)$$

Sur une courbe d'écoulement de τ en fonction de γ , la viscosité apparente en un point représentatif de la courbe, représente la pente de la droite joignant l'origine à ce point [Cyr 1999].

e. Concentration volumique :

En rhéologie, il est courant d'exprimer les concentrations en volume plutôt qu'en masse. On définit ainsi une concentration volumique solide notée (Γ), qui peut être reliée aux rapports massiques E/C ou E/L dans le cas d'une pâte de ciment à laquelle on a additionné des fines minérales, grâce aux relations suivantes :

$$\Gamma = V_s / (V_s + V_e) \quad (1.7)$$

V_s et V_e sont respectivement les volumes de solide et d'eau.

En fonction du rapport eau/ciment (E/C) :

$$\Gamma = X / (X + E/C) \quad (1.8)$$

Avec

$$X = \{ (1 / d_c) + (p / (1-p))d_a \} \quad (1.9)$$

Où p est le taux de substitution massique, d_c et d_a sont respectivement les densités du ciment et de l'addition.

3.2 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE

Un comportement rhéologique d'un matériau est dit **viscoplastique** lorsque son écoulement se produit au delà d'une certaine valeur de contraintes appliquées, appelée **seuil de cisaillement** τ_0 . Les fluides ne possédant pas de seuil de cisaillement sont dits exclusivement **visqueux** ; ceux qui en possèdent un sont dits **viscoplastiques** [Cyr 1999].

Que ce soit pour les bétons ou pour les pâtes de ciment, la rhéologie permet de caractériser leur mouvement lors de leurs écoulements en les considérant comme des milieux continus. Elle permet d'analyser leurs écoulements en étudiant les contraintes et déformations subies par ces matériaux. L'exploitation de ces paramètres conduit à l'élaboration des rhéogrammes où les courbes d'écoulement relient généralement les contraintes de cisaillement (τ) aux vitesses de cisaillement (ou gradients de vitesse) (γ).

Dans la littérature, il est courant de trouver des représentations graphiques donnant les variations de la viscosité en fonction du gradient de vitesse au lieu des courbes contraintes-déformations. Suivant le type d'écoulement, on obtient différentes variations de la viscosité [Cyr 1999] :

- **Fluides Newtoniens** : la viscosité apparente est constante (viscosité absolue).
- **Fluides Binghamiens** : la viscosité apparente décroît lorsque (γ) augmente.

4. PROPRIETES DES BÉTON AUTOPLAÇANTS

4.1 INTRODUCTION

Il est évident que la composition des bétons autoplaçants diffère que celle des bétons ordinaires (Cf paragraphes 2.1 et 2.6). Du point de vue rhéologique, la grande déformabilité d'un béton autoplaçant est mise en rapport avec sa contrainte de cisaillement, un seuil minimum serait exigé. Le béton ordinaire a des valeurs de contrainte supérieures typiques autour de 500 Pa, alors que les valeurs correspondantes pour les bétons autoplaçants varient de quelques Pa à 50 Pa [Wall 2003].

La particularité de la composition des bétons autoplaçants (volume de pâte élevé, quantité de fines importante) leur confèrent des propriétés particulières à l'état frais (caractéristiques rhéologiques) qu'à l'état durci. Dans ce qui suit, quelques propriétés de ces bétons seront élucidées, il serait donc judicieux de revoir quelques études faites sur les bétons autoplaçants à ce sujet, puisqu'en Algérie, ces bétons sont à découvrir pour les chercheurs.

4.2 PROPRIETES A L'ETAT FRAIS

Plusieurs paramètres de composition ont une influence significative sur les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais ou au jeune âge. En effet, en fixant le rapport E/L et les teneurs en ajouts chimiques, l'influence de la teneur et de la nature de l'ajout minéral et de l'agent colloïdal a montré [Khayat 2004] de bonnes performances de la maniabilité, de la déformabilité et de stabilité du béton frais.

Dans l'étude (Khayat 2004), toutes les formulations de béton ont été faites avec un rapport volumique sable/pâte de 0,6, un rapport E/L de 0,41 et une combinaison de granulats 14 et 20 mm avec un volume total constant de 300 L (70% Ø14 et 30% Ø20). L'étude du tassement du béton durant cette étape a été faite sur des colonnes de 70 cm de hauteur.

La Figure 1.14 résume les résultats obtenus avec un des trois bétons autoplaçants (3% de fumée de silice-20% de cendres volantes), traitant de l'effet du dosage de l'agent colloïdal sur le diamètre d'étalement (fluidité), la capacité de remplissage (déformabilité), le tassement et le lessivage après 3 plongées dans l'eau (stabilité).

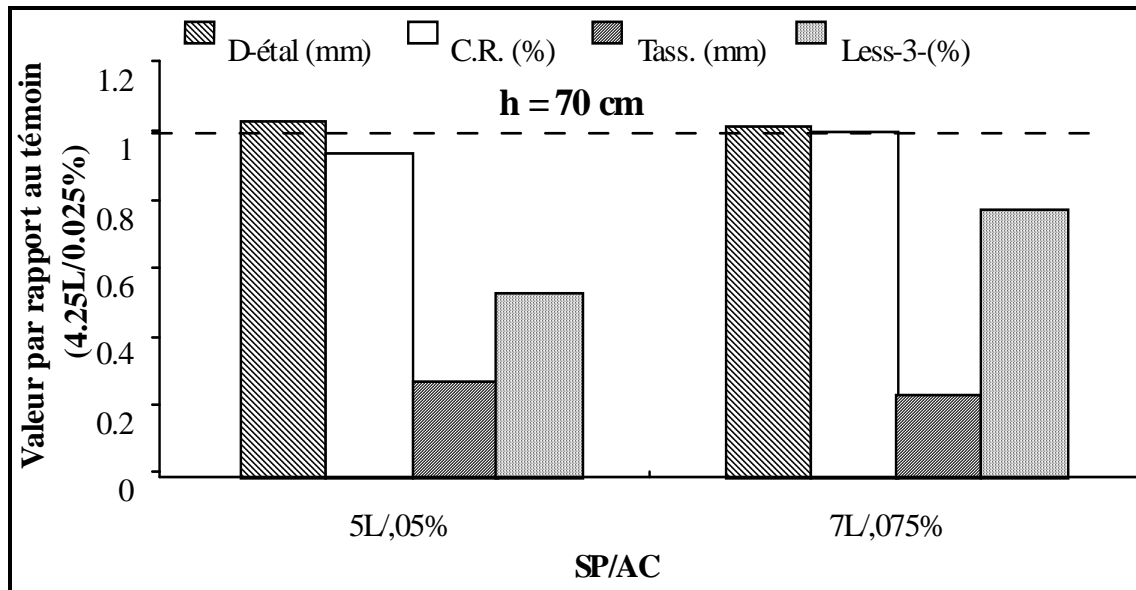


Figure 1.14 : Effet de la teneur en agent colloïdal sur les propriétés des bétons avec 3% FS + 20% CV (tassement sur colonne de 70 cm de hauteur) [Khayat 2004].

La figure 1.14 ci-dessus montre à titre d'exemple, que le diamètre d'étalement (D-étal) d'un béton autoplaçant avec 3% de fumée de silice et 20 % de cendres volantes, dépasse légèrement celui du béton témoin sans ajout (de l'ordre de 10%)

Pour les caractéristiques à court terme, il a été montré dans l'étude de (Haddad et al) [Haddad 2004], que les temps de début et fin de prises ainsi que « la période dormante » sont supérieurs à ceux des bétons ordinaires. En terme de calorimétrie semi-adiabatique, le suivi thermique des réactions d'hydratations des BAP a montré que l'échauffement maximal obtenu est inversement proportionnel au taux de filler introduit.

En termes de rhéologie, les diamètres d'étalement au cône d'Abrams sont proportionnels au rapport Eau/Liant et à la teneur en superplastifiant respectivement [Abbib 2004], alors que le rapport sable/pâte est inversement proportionnel au taux de ségrégation, ceci est essentiellement dû à la diminution du volume de la pâte par rapport à celui du sable. Toujours du point de vue rhéologique, (Ferraris et al) [Ferraris 1998] ont établi une relation directe entre la contrainte de cisaillement et le diamètre d'étalement d'un béton autoplaçant, ces travaux ont aboutit à l'établissement des courbes suivantes :

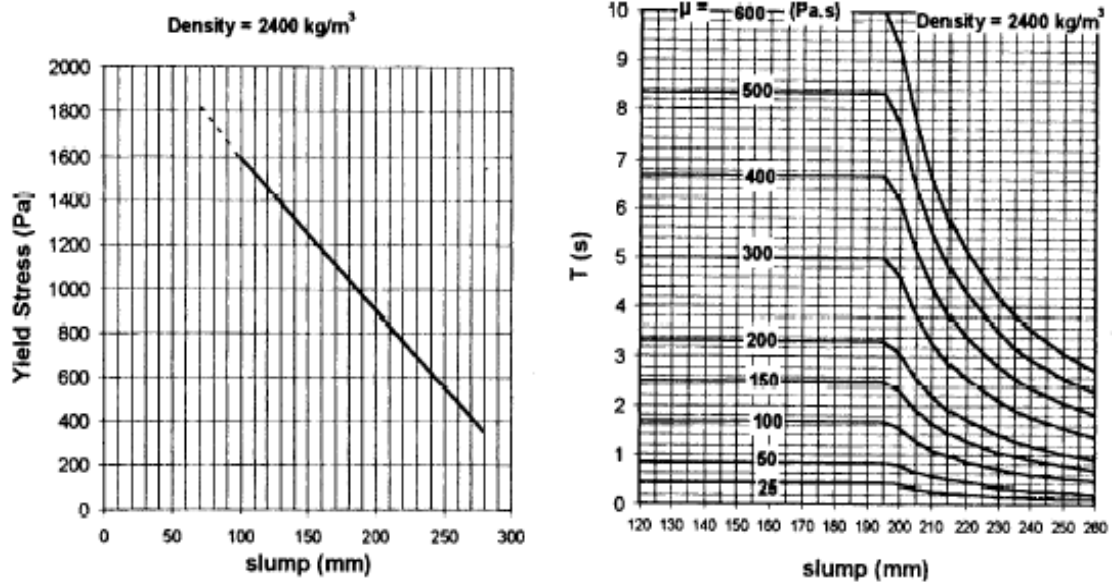


Figure 1.15 : Nomographe de l'estimation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité plastique des résultats de l'étalement d'un béton autoplaçant (densité 2,4) [Ferraris 1998].

D'autre part, le comportement rhéologique d'un béton autoplaçant est non linéaire, rhéoépaississant de type Hurschel-Bulley [Naadia 2004]. Cet état serait directement associé à la pâte (la matrice), les granulats ne faisant qu'amplifier ou atténuer cet état par leur arrangement dans la matrice. Le caractère rhéoépaississant diminue avec la diminution de la taille des granulats [Naadia 2004].

Par ailleurs, du point de vue écoulement, des études menées sur l'influence de la concentration en granulats sur l'écoulement du béton vibré, mais aussi valables pour le béton autoplaçant frais ont apporté les constatations suivantes [Barrioulet 1987] :

- Pour une concentration en granulat inférieure à 40%, le comportement du béton frais est principalement fonction de la masse volumique des granulats et l'écoulement est freiné par l'augmentation de la proportion des granulats sauf pour des concentrations allant de 15 à 25%.
- Pour une concentration proche de 40%, l'effet des granulats contribue sur l'écoulement par le processus de frottement.

4.3 PROPRIETES A L'ETAT DURCI

Pour faciliter l'introduction des bétons autoplaçants dans les constructions générales et usuelles en béton, il est nécessaire de montrer les propriétés de ces bétons à l'état durci. Mise à part les fines calcaires qui sont utilisées en quantité considérable, les matériaux de base (ciments et granulats) sont les mêmes que ceux utilisés dans la fabrication des bétons vibrés traditionnels, mais à des proportions différentes ; les autres matériaux supplémentaires (additions minérales, superplastifiant et agent de viscosité) sont introduits à de faibles quantités dans une unité de volume du béton, mais sont très influençant sur les propriétés à moyen et long termes (état durci) [**Guide 2000**].

Dans ce qui suit, quelques propriétés des bétons autoplaçants à l'état durci sont illustrées, elles sont inspirées de quelques études faites par des chercheurs à ce sujet.

4.3 1- Résistance mécanique

La résistance à la compression est l'une des plus importante propriété du béton durci, le caractérisant en vue de sa classification dans les normes internationales. Comparativement aux bétons ordinaires, les bétons autoplaçants suivent les mêmes évolutions de résistances à la compression [**Klaus 2002**]; d'ailleurs, jusqu'à l'âge de 28 jours, il n y pas de différence significative entre les résistances atteintes par les deux bétons confectionnés de mêmes compositions, sauf pour le cas où le béton autoplaçant est préparé avec le même rapport E/C que le béton vibré, dans ce cas, la résistance du BAP est meilleure [**Klaus 2002**]. La Figure 1.16 montre qu'un béton autoplaçant confectionné avec les fillers calcaires développerait de meilleures résistances à la compression par rapport aux autres additions minérales.

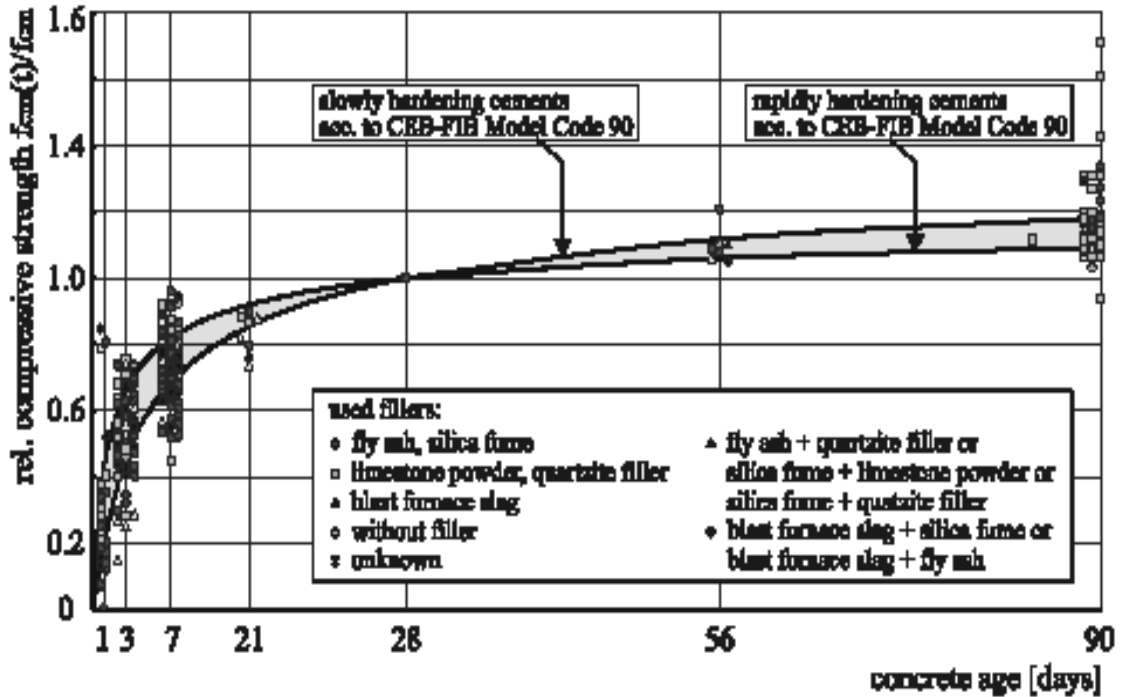


Figure 1.16 : Développement des résistances à la compression en fonction du temps [Klaus 2002].

En n'utilisant que des fillers calcaires, la Figure 1.17 montre que jusqu'à l'âge de 28 jours, les résistances à la compression des bétons autoplaçants seraient inversement proportionnelles aux taux de substitutions du ciment par ces additions [Haddad 2004] :

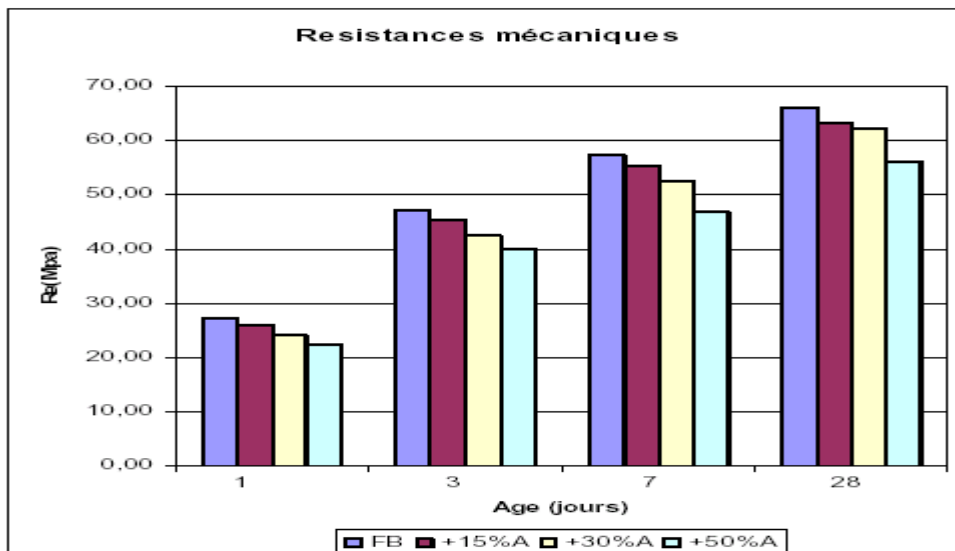


Figure 1.17 : Évolution des résistances en fonction du temps et du taux de substitution du ciment par les fillers calcaires [Haddad 2004].

Mais comme il a longtemps été reconnu par [Ferret 1892] et [Abrams 1918], la résistance à la compression des matériaux cimentaires (notamment ceux des bétons) est fonction directe de leurs porosités, celles-ci dépendraient des quantités d'eau et d'air initialement introduites lors du malaxage.

4.3 2- Module d'élasticité

Se basant sur l'approche de composition : le fait que le module d'élasticité des granulats est plus important que celui de la pâte de ciment et que le volume absolu de la pâte du béton autoplaçant est plus grand que celui de la pâte contenu dans le béton ordinaire, le module d'élasticité du béton autoplaçant serait forcément inférieur à celui du béton ordinaire avec une résistance à la compression comparable [Bonen 2005]. En effet, dans un béton confectionné avec des granulats classiques, le module de matrice cimentaire (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats (60000-100000MPa) [Assié 2004]. Il a été aussi montré que le module d'élasticité du béton autoplaçant pouvait avoir une valeur de plus de 20% inférieure à celle du module d'un béton vibré de même résistance et fabriqué avec le même type d'agrégats [Klaus 2002].

4.3 3- Résistance au gel - dégel :

Le gel provoque la migration d'eau contenue dans les pores vers les zones où elle peut geler et créer des fissures sous l'effet de la formation de glace. Lors du dégel, ces fissures ne se referment pas et se remplissent d'eau qui est disponible pour un nouveau cycle de gel [Assié 2002].

La résistance au gel – dégel d'un béton dépend de différentes propriétés (résistance à la traction, fluage, déformabilité) mais surtout des caractéristiques et du taux de saturation de son réseau poreux. Les résultats présents dans la littérature montrent nettement que les bétons autoplaçant, formulés sans entraîneurs d'air, sont plus résistants au gel – dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C) [Assié 2002].

Cette propriété est mise en évidence par la perte de la vitesse de fréquence ultrasonique (UPV : Ultrasonic Pulse Velocity). En effet, après des cycles journaliers de 18 heures à -30°C , et 6 heures à température ambiante, aucune perte significative n'a été observée après 150 cycles pour les bétons autoplaçants [Guide 2000], cela veut dire que les bétons autoplaçant ont une aussi bonne résistance au gel/dégel que les bétons à haute performance ; ces essais ont été effectué par la " Swedish Road Association for SCC-mixes ".

4.3 4- Retrait

L'évolution du retrait comporte plusieurs phases qui se corrèlent bien avec le tassement, la prise et la dépression capillaire.

Plusieurs facteurs influencent sur le retrait du béton, y compris les volumes de la pâte et des granulats, les pores microscopiques ainsi que les natures des éléments constitutifs. Une discussion sur les facteurs influençant sur le retrait constitue une thèse entière. Néanmoins, il serait acceptable de dire que le volume total des agrégats a probablement le plus grand impact sur le retrait. Pickett [Pickett 1958] a proposé la relation suivante :

$$S_c = S_p (1 - V_{ag})^n \quad (1. 10)$$

Où S_c et S_p sont les retraits (déformations) du béton et de la pâte respectivement, V_{ag} est le volume des agrégats, n est une constante ($n > 1$).

Puisque le volume de la pâte des bétons autoplaçants est plus grand que celui du béton ordinaire, les retraits des BAP seraient plus importants de ceux des bétons ordinaires.

Une comparaison stricte des valeurs des retraits de séchage dans la littérature est problématique à cause des différences dans les formulations, dans les procédures expérimentales, dans la taille des spécimens soumis à l'étude et enfin dans l'humidité et températures auxquelles ces spécimens ont été exposés [Bonen 2005]. Par conséquent, ce n'est pas une surprise que les résultats du retrait rapportés par la littérature s'éparpillent sur un grand intervalle.

4.3 5- Quelques aspects de durabilité

La perméabilité du béton, indicateur principal de durabilité a été étudiée par l'absorption d'eau à la surface du béton. Les résultats indiquent que vu la densité des bétons autoplaçants, la résistance à l'absorption d'eau à la surface du béton est meilleure comparés aux bétons ordinaires de référence. La distance de carbonatation mesurée au bout d'une année est de 0 à 2mm [Guide 2000].

4.3 6- Performances structurales

Les performances structurales sont mises en évidence par charges uniformes appliquées sur des éléments verticaux (poteaux) et horizontaux (poutres) en béton autoplaçant. Pour les poteaux, la charge de rupture localisée excède celle calculée (estimée) pour les bétons traditionnels vibrés; alors que pour les poutres, les mêmes résistances ont été observées en terme de moments de flexion et d'efforts tranchants. Les résultats des tests indiquent qu'on

peut soumettre les bétons autoplaçants aux règles de l'Eurocode2 sans modification [Guide 2000].

4.3 7- Béton autoplaçant renforcé de fibres métalliques

Les résultats des essais montrent des caractéristiques meilleures que ceux des bétons traditionnels vibrés [Guide 2000].

5. BILAN ET SYNTHÈSE

Le béton autoplaçant n'est pas un nouveau béton, mais plutôt une nouvelle application qui est dérivée d'un rapide développement de technologie, qui exige une compréhension de l'influence des paramètres fondamentaux aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

Un béton autoplaçant peut être formulé de plusieurs façons, ses propriétés varieront alors dans une large gamme en fonction de la formulation utilisée. Néanmoins, à défaut de rapport E/L typiquement bas, ses performances sont meilleures de ceux d'un béton ordinaire.

Parce que le béton autoplaçant est complexe et issu d'une nouvelle technologie, il serait essentiel de comprendre la relation entre rhéologie, composition et propriétés à l'état durci. Avec cette considération, deux effets doivent être notés conjointement :

- Le béton autoplaçant est spécifiquement vulnérable à la ségrégation.
- A résistance à la compression égale, le béton autoplaçant a montré un retrait élevé par rapport à celui du béton conventionnel.

En plus de tout ce que a été dit, les bétons autoplaçants présenterait un net avantage vis-à-vis des propriétés rhéologiques que ceux des bétons ordinaires, ce qui leur procure une meilleure dispersion entre les ferrailles et par la suite un taux de construction beaucoup plus rapide.

6. AXES DE RECHERCHE ET APPORTS DE LA THESE

A l'issue de la recherche bibliographique effectuée, il a été constaté qu'une nouvelle génération de béton fluide peut être élaborée à partir des mêmes matériaux utilisés pour la confection des bétons ordinaires, seules les proportions sont différentes. La quantité de fines qui est plus importante, donnerait à ce béton son caractère autoplaçant: cela signifie que c'est un béton très fluide et homogène, ne présentant donc pas de ségrégation et pouvant se mettre en place dans les coffrages sans vibrations. Pour cela, le béton élaboré doit satisfaire aux

propriétés d'ouvrabilité recommandées par l'Association Française de Génie Civil (AFGC 2000). Il s'agit principalement de sa capacité de passage à travers un ferrailage assez dense, de sa résistance à la ségrégation et du taux de remplissage: ses critères sont vérifiés par l'essai de boîte en "L", l'essai de ségrégation au tamis et l'essai de mesure du diamètre d'étalement au cône d'Abrams respectivement.

Par ailleurs, d'autres points jugés important sont relatés dans ce qui suit:

- ✓ Les trois essais dits d'ouvrabilité recommandés par l'AFGC sont suffisants pour qualifier un béton d'autoplaçant. C'est à l'état frais qu'on caractérise un béton autoplaçant; néanmoins, d'autres essais caractéristiques peuvent être complémentaires mais aussi nécessaires pour observer d'autres critères d'autoplacibilité tel que le "V-Funnel test", l'essai de boîte en forme de "U" ou le "J-Ring test".
- ✓ Des essais dits rhéologiques relatifs à la capacité d'écoulement sous seul effet de gravité et à l'homogénéité des BAP peuvent être effectués. Ces deux caractérisations peuvent être définies par leur seuil de cisaillement et leur viscosité.
- ✓ L'élaboration des BAP nécessite l'utilisation d'un volume important de fines de diamètre inférieur à 80 μm (aux environs de 500 kg/m^3) et un faible volume de granulats dont le diamètre maximal varie de 10 à 20 mm. Un important volume de pâte (formée de ciment, d'additions, d'adjuvant, d'eau efficace et d'air) serait nécessaire puisque les frottements entre les granulats limiteraient l'étalement et la capacité de remplissage des bétons autoplaçants. Le volume de la pâte varie de 330 à 400 l/m^3 . Un fort dosage en superplastifiant serait aussi nécessaire pour la fluidité de ces bétons, ce dosage est souvent proche de celui de saturation sans pour autant provoquer la ségrégation.
- ✓ L'utilisation d'un agent de viscosité (rétenant d'eau) est possible mais pas nécessaire, puisque cet agent a le même rôle que celui des fines particules : minimiser la ségrégation des granulats et éviter le blocage par épaissement de la pâte et rétention de l'eau sur le squelette solide.
- ✓ Un béton, notamment autoplaçant, peut être considéré comme un mélange biphasique : phase liquide – phase solide, ou suspensions fluides – solides, ou pâte – granulats ou encore mortier – gravier, selon l'échelle choisie pour l'étudier et selon les propriétés paramétriques que nous voulons faire apparaître. A l'échelle de la pâte, les propriétés rhéologiques d'ouvrabilité et de fluidité du béton autoplaçant sont étroitement liées à celles de la pâte qui le compose.

Tenant compte de qui a précédé, toute étude rhéologique à effectuer sur un béton autoplaçant doit nécessairement passer par sa pâte. En effet, parmi les méthodes étudiées dans notre synthèse bibliographique, celle qui nous semble intéressante est celle qui stipule que la confection d'un béton autoplaçant passe d'abord par la formulation et l'élaboration d'une pâte autoplaçante. Cela veut dire que le critère d'autoplaçabilité concerne essentiellement la pâte de ciment, c'est le principe de la formulation d'un béton autoplaçant se basant sur l'optimisation de la pâte décrite au paragraphe (§ 2.3 2) développée par Oh et al [Oh 1999], c'est aussi la méthode équivalente utilisée par les chercheurs du Laboratoire Matériaux et Durabilité de Construction (L.M.D.C) de l'I.N.S.A, Université Paul Sabatier de Toulouse.

Ce type d'approche de formulation traite des corrections en fines, en dosage en adjuvant et en eau (Rapport E/L).

Ainsi, compte tenu de ces remarques, notre apport dans ce travail de recherche concerne les axes suivants :

- La disponibilité des matériaux naturels en abondance dans la région ouest algérienne, tels que la pouzzolane naturelle de Béni-Saf utilisée par deux principales cimenteries pour la fabrication de ciments pouzzolaniques et les gisements rocheux servant à l'alimentation des chantiers en granulats concassés, nous a poussé inscrire ce travail dans le cadre de la valorisation de ces matériaux locaux.
- Une démarche expérimentale a été utilisée par les chercheurs du L.M.D.C-INSA de Toulouse et a abouti à l'obtention d'un béton aux propriétés autoplaçantes, l'idée est donc d'appliquer cette méthode à nos matériaux locaux et d'étudier les critères rhéologiques des mélanges issus de ces matériaux pour la formulation d'un béton autoplaçant. Pour cela, nous nous sommes proposés d'utiliser les ciments pouzzolaniques fabriqués par l'une de ces cimenteries, les fines calcaires issues de la carrière de Kristel et de ne pas utiliser d'agent de viscosité dans la procédure de formulation de la pâte.
- Deux grandes étapes constituent notre étude, la première se fait sur les pâtes : il s'agit de faire une combinaison aussi large que possible entre les constituants de base (Ciment, Filler en substitution partielle au ciment, Superplastifiant et eau) pour préparer des pâtes de ciment. Le but est de pouvoir confectionner une pâte autoplaçante en s'appuyant sur les résultats des essais au mini-cône (pour les mesures des diamètres d'étalement) et au cône de Marsh (pour les mesures de

temps d'écoulement d'un volume donnée de pâte). En se basant sur l'analyse des courbes iso-réponses après délimitation d'un domaine expérimental, puis sur l'utilisation de la méthode des plans de mélange avec laquelle le recours à l'outil informatique est inévitable, une formulation de pâte autoplaçante pourrait être obtenue, cette pâte est constituée de proportions optimales de chacun des quatre paramètres de composition.

- La deuxième étape consiste à injecter à cette pâte un squelette solide formé d'une combinaison de sable et de graviers. L'analyse bibliographique a montré que le diamètre maximal des grains varie entre 10 et 20 mm, nous avons choisi d'utiliser des granulats concassés de diamètre maximal de l'ordre de 15 mm. Nous proposons de tenter de confectionner un béton autoplaçant en injectant à la pâte autoplaçante obtenue un squelette granulaire de rapport Gravier/Sable (G/S) de 0.8, 1 et 1.2. dans ce cas, des essais supplémentaires sur ces granulats seront nécessaires, tel que l'essai de détermination de la quantité d'eau retenue par les granulats pour chaque rapport G/S. On ne peut attribuer le caractère autoplaçant à ces bétons que lorsqu'ils auront satisfait les recommandations de l'Associations Française de Génie Civil (A.F.G.C) qui sont considérées comme normatives par les chercheurs et les expérimentateurs. Nous nous contentons de vérifier l'ouvrabilité par l'étalement au cône d'Abrams, de la fluidité par l'écoulement de la boîte en « L » et de l'étude de la ségrégation par l'essai au tamis.
- En fin de l'étude, il serait aussi judicieux de mesurer l'ordre de grandeur des résistances à la compression et à la traction des bétons autoplaçants ainsi formulés à base de matériaux locaux algériens.