

Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf – ORAN-

Département de génie civil



Polycopié des Travaux Pratiques

METHODES EXPERIMENTALES

PARTIE -I-

‘Eléments de méthodes de formulation et tests de caractérisation des bétons auto-plaçants à l’état frais’
- M 1 Structures –



Rédigé par Dr. KAID Nouria

Maître de Conférences / A

Faculté d’Architecture et de Génie Civil

Département de Génie Civil | 2020/2021

<http://www.univ-usto.dz>

Table des matières

Table des matières.....	1
Préambule.....	3
Tests de caractérisation des bétons auto-plaçants à l'état frais.....	4
1. Objectifs.....	4
2. Définitions.....	4
2.1. Symboles et abréviations	4
2.2. Béton Auto-Plaçant 'BAP'	4
2.3. Ouvrabilité des 'BAP'.....	5
2.3.1. Mobilité.....	6
2.3.2. Résistance à la ségrégation	6
2.3.3. Etalement au cône d'Abrams.....	6
2.3.4. Viscosité apparente	6
2.3.5. Aptitude à l'écoulement	6
2.4. Choix des constituants	6
2.5. Avantages et inconvénients.....	7
3. Méthodes de formulations des 'BAP'	7
3.1. Méthode Japonaise	8
3.2. Méthode Suédoise	8
3.3. Méthode dite Française (LCPC).....	8
3.4. Méthode basée sur l'optimisation du volume de la pâte	9
4. Confection et caractérisation des BAP à l'état frais.....	9
4.1. Confection des 'BAP'	9
4.1.1. Objectifs.....	9
4.1.2. Matériel nécessaire	10
4.1.3. Matériaux utilisés.....	10
4.1.4. Mode de malaxage	10
4.2. Caractérisation des 'BAP' à l'état frais.....	12
4.2.1. Classes de consistance	12
4.2.2. Principe d'échantillonnage selon la norme NF EN 12350-1 juin 2019 [17]	12
4.2.3. Test d'étalement au cône d'Abrams (Slump-Flow) selon la norme NF EN 12350-8 [18]	13
4.2.3.1. Matériel nécessaire.....	13
4.2.3.2. Mode opératoire	14
4.2.3.3. Résultat de l'essai.....	15

4.2.3.4. Rapport de l'essai	16
4.2.4. Test d'écoulement à l'anneau (anneau japonais 'J-Rin g') selon la norme NF EN 12350-12 [22]	17
4.2.4.1. Matériel nécessaire.....	17
4.2.4.2. Mode opératoire	18
4.2.4.3. Expressions des résultats	19
3.1. Taux de remplissage P_f	19
3.2. Etalement SF_j	20
3.3. Temps d'écoulement t_{500j}	20
3.4. Rapport de l'essai	21
4.2.5. Test de l'écoulement à la boîte en L (L-Box) selon la norme NF EN 12350-10 [23].....	21
4.2.5.1. Matériel nécessaire.....	22
4.2.5.2. Mode opératoire	23
4.2.5.3. Expression des résultats.....	23
4.2.5.4. Rapport de l'essai	24
4.2.6. Test de l'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel) selon la norme NF EN 12350-9 [24].....	24
4.2.6.1. Matériel nécessaire.....	25
4.2.6.2. Mode opératoire	25
4.2.6.3. Rapport de l'essai	26
4.2.7. Test de la stabilité au tamis selon la norme NF EN 12350-11 [27].....	26
4.2.7.1. Matériel nécessaire.....	28
4.2.7.2. Mode opératoire.	28
4.2.7.3. Expression des résultats.....	28
4.2.7.4. Rapport de l'essai	29
5. Travail demandé.....	30
6. Conclusion	31
7. Références bibliographiques	32

Préambule

La vérification des caractéristiques des bétons auto-plaçants à l'état frais constitue la première condition pour certifier une application appropriée et adaptée de ce matériau aux types d'ouvrages envisagés. Dans le but d'assurer une bonne maîtrise du contrôle des bétons auto-plaçants, il semble être intéressant de rédiger ce polycopié basé sur un recueil des éléments de méthodes de formulation effectués et vérifiés au laboratoire, et des différents tests et moyens de caractérisation de ces bétons à l'état frais.

Ce document représente une première partie d'un support pédagogique des travaux pratiques, destiné aux étudiants inscrits en première année Master Structures, du département de 'Génie Civil', de l'université des Sciences et de la Technologie, Mohamed Boudiaf d'Oran (USTOMB-Algérie) assurés depuis 2015 au département de Génie Civil. Basé sur certaines recommandations françaises, normes internationales et européennes, dictant les exigences, les règles et les expériences pouvant servir au contrôle de la rhéologie des bétons auto-plaçants, ce document trace de par son contenu un pilotage indispensable aux étudiants, doctorants et ingénieurs sur chantier. Il rassemble un certain nombre de tests, liés à la caractérisation des bétons auto-plaçants à l'état frais dans le cas des milieux confinés et non confinés, les plus connus et les plus nécessaires pour l'ingénieur de génie civil, qui est mené à contrôler le béton au laboratoire (tests de contrôle) ou in-situ (tests de convenance). La deuxième partie de ce document concernera un recueil des tests de caractérisation physique et mécanique des bétons auto-plaçants à l'état durcis, ainsi que des tests accélérés basés sur des indicateurs de durabilité.

Etant considéré comme un cahier de TP destiné à l'étudiant, ce polycopié doit être lu avant de se présenter à la séance de TP. L'étudiant devra déduire les hypothèses retenues et les appliquer correctement pour répondre aux objectifs du TP. Il faut prévoir dans cette étape, les expériences permettant de vérifier la faisabilité des tests de caractérisation du béton à l'état frais, en listant ainsi le matériel nécessaire et disponible au laboratoire et pratiquer attentivement les expériences. Les observations et les interprétations des expériences permettront aux étudiants de saisir en temps voulu, les hypothèses considérées au début, soit en les conservant tel quel, ou soit en les modifiant selon le cahier de charges exigé sur chantier. L'étudiant répondra aux questions avec précision pour pouvoir à la fin conclure en présentant un résumé de ce qu'il a pu découvrir lors des TP. Son compte rendu doit être court et répondant aux objectifs fixés.

Je souhaite vivement que ce document puisse rendre service à de futurs jeunes ingénieurs et Masters en génie civil et toute autre personne intéressée par ce domaine.

Bonne lecture de l'ensemble de ce document et bon travail.

Toutes vos remarques ou questions sont les bienvenues aux adresses : n.kaidustomb@gmail.com, nouria.kaid@univ-usto.dz.

Tests de caractérisation des bétons auto-plaçants à l'état frais

1. Objectifs

Cette partie des travaux pratiques effectués au niveau du laboratoire pédagogique du département de génie civil d'USTOMB, apportera à l'étudiant des outils expérimentaux, pour la caractérisation rhéologique du béton auto-plaçant à l'état frais. Ces outils seront rapportés dans ce document pour permettre à l'étudiant de maîtriser les tests.

2. Définitions

L'élaboration de ce présent travail pratique nécessite l'introduction des termes et définitions donnés dans les normes européennes NF EN 206-1 [1] et NF EN 206-9 [2]. Les recommandations Françaises de génie civil 'AFGC' [3] et la norme 'EFNARC' (European Federation of National Associations Representing for Concrete) [4] seront introduites pour des éventuelles applications.

2.1. Symboles et abréviations

Les symboles et abréviations suivants s'appliquent dans la suite de ce polycopié :

- * **BAP** : Béton auto-plaçant ;
- * **SF** : Classe de consistance par l'essai d'étalement au cône d'Abrams ;
- * **VS** : Classe de viscosité apparente pour l'essai t_{500} ;
- * **VF** : Classe de viscosité apparente pour l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V ;
- * **t_{500}** : temps d'écoulement en secondes pour atteindre un étalement de 500 mm au cône d'Abrams ;
- * **PL** : Classe d'aptitude à l'écoulement (taux de remplissage) pour l'essai à la boîte en L ;
- * **PJ** : Classe d'aptitude à l'écoulement pour l'essai d'écoulement à l'anneau ;
- * **SR** : Classe de résistance à la ségrégation (% de laitance) lors de l'essai de stabilité au tamis.

2.2. Béton Auto-Plaçant 'BAP'

Le béton auto-plaçant 'BAP' est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction s'effectue par le seul effet gravitaire) [3]. Les bétons auto-plaçants 'BAP' se distinguent des bétons ordinaires 'BO' principalement par leurs propriétés à l'état frais et leur capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet de la gravité [2-3] [5]. Les constituants des 'BAP' peuvent être assez différents de ceux des 'BO'. Ils peuvent différer

considérablement par leurs proportions et/ou par leur nature. Selon leur utilisation, les constituants entrant dans la fabrication du 'BAP' constituent les matériaux de base, qui sont : les ciments, les granulats, l'eau de gâchage, les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques (fig. 1).

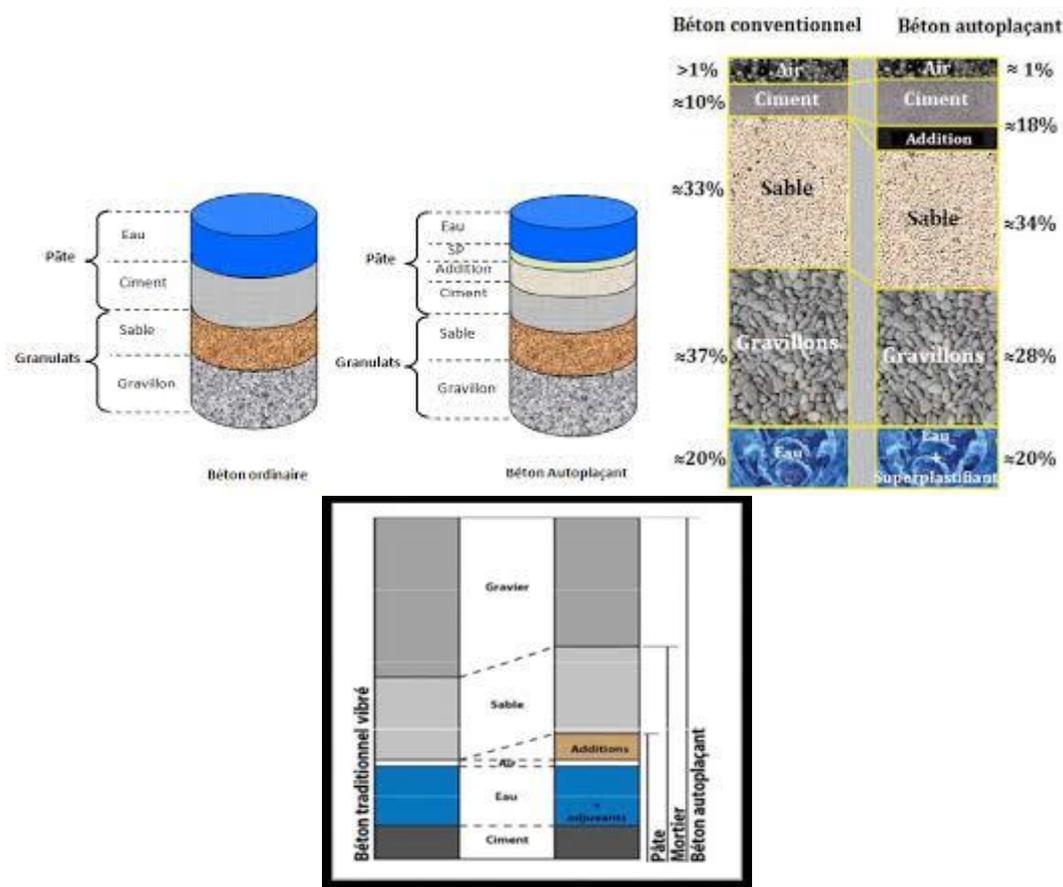


Fig. 1. Composition d'un béton ordinaire 'BO' et d'un 'BAP' - Aspect à l'état frais [6].

2.3. Ouvrabilité des 'BAP'

Le 'BAP' doit pouvoir s'écouler facilement, sous le simple effet de la gravité, sans qu'il soit contrarié par les obstacles rencontrés dans le coffrage (armatures, effets de paroi, réservations,.....etc.). Cet écoulement doit se faire sans ségrégation notable, y compris dans la phase terminable et où la gravité pourrait entraîner une séparation des différentes phases du béton (en particulier, séparation entre les plus gros granulats et le mortier) [7].

L'ouvrabilité des 'BAP' se décompose en trois caractéristiques principales [3] :

- Fluidité et mobilité en milieu **non confiné** (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams),
- Ecoulement en milieu **confiné** (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L),
- stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage du 'BAP' qui doit être stable sous l'effet de la gravité, décrite par l'essai de stabilité au tamis).

2.3.1. Mobilité

C'est la facilité d'écoulement du 'BAP' frais lorsqu'il n'est pas confiné par le coffrage et/ou le ferrailage.

2.3.2. Résistance à la ségrégation 'dynamique et statique'

C'est la capacité du 'BAP' frais à conserver une composition homogène. En phase de coulage, ces bétons doivent offrir une bonne résistance à la ségrégation 'dynamique'. Une fois mis en place, ils doivent offrir une bonne résistance à la ségrégation 'statique'.

2.3.3. Etalement au cône d'Abrams

C'est le diamètre moyen d'étalement mesuré avec un cône d'Abrams sur un 'BAP' à l'état frais.

2.3.4. Viscosité apparente

C'est la résistance à l'écoulement du béton frais, mesurée par un temps correspondant à un diamètre de béton étalé, de 500 mm ' t_{500} ', une fois que l'écoulement a commencé.

2.3.5. Aptitude à l'écoulement

C'est l'aptitude du 'BAP' frais à s'écouler à travers des zones confinées, y compris des espaces entre les barres d'armature et autres inserts, sans aucune ségrégation ou aucun blocage.

2.4. Choix des constituants

Granulats

- * Importance de la forme des grains vis-à-vis de la mobilité en milieu confiné ou non ;
- * D_{\max} limité (entre 10 et 20 mm) pour assurer la mobilité en milieu confiné ;

Ciments

- * Ciment adapté à la gamme de résistance visée et à la classe d'environnement ;
- * Pas de spécificité particulière liée au caractère auto-plaçant sauf dans le cas d'une bonne compatibilité avec les superplastifiants.

Additions minérales

- * Nécessité d'un volume de pâte élevé assurant la mobilité en milieu confiné ou non ;
- * Nécessité d'une quantité élevée de fines dont le diamètre des grains $\varnothing < 125 \mu\text{m}$ pour assurer la mobilité et la stabilité du béton. En général, il est nécessaire d'utiliser des additions minérales (Fillers calcaires, cendres volantes, laitiers, ...etc).

Superplastifiants

- * Indispensable pour obtenir la mobilité ;
- * Choix du bon couple ciment/superplastifiant (bonne compatibilité).
Exemple : superplastifiant Optima 200, haut réducteur d'eau de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié.

Agent de cohésion

- * Effet attendu : formules moins sensibles à des fluctuations d'eau vis-à-vis des problèmes de ressuage et de ségrégation ;
- * Nature :
 - Dérivés celluloseux/ HEC, HPMC...
 - Polymères naturels : Gommés (welan, xanthane) et biopolymères ;
 - Suspensions colloïdales.

2.5. Avantages et inconvénients [8]

2.5.1. Avantages : Parmi les avantages des bétons auto-plaçants :

- * Absence de vibration pour sa mise en place ;
- * Facilité et rapidité de la mise en œuvre ;
- * Amélioration des conditions de travail suite à l'absence de nuisances sonores ;
- * Excellent remplissage des coffrages ;
- * Béton de qualité et surface plane, régulière ;
- * Possibilité de bétonner des formes complexes ;
- * Réduction/suppression des travaux de ragréage ;
- * Facilité de bétonnage des éléments avec une armature dense ou importante ;

2.5.2. Inconvénients

Étant un béton très fluide, le temps de séchage du béton auto-plaçant est un peu plus important. Il peut montrer un risque élevé de ségrégation lorsque le mélange n'est pas bien réalisé. De plus, son coût est un peu plus élevé. Toutefois, ces différents points ne constituent pas de grands inconvénients à l'utilisation du béton auto-plaçant.

3. Méthodes de formulations des 'BAP'

La formulation des bétons auto-plaçants est une opération complexe qui se fait, dans la plupart des cas, de manière empirique, alors qu'il existe des approches plus rationnelles. Elle nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des 'BAP' (fluidité et homogénéité) [9-10]. Quatre méthodes de formulation récurrentes dans la littérature sont présentées à titre indicatif ci-dessous.

3.1. Méthode Japonaise

L'approche japonaise développée à l'Université de Tokyo par Okamura H. et *a.l.*, [11] se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous-dosés en granulats et par conséquent loin d'atteindre un optimum économique. Au Japon, le surcoût engendré sur le matériau est compensé par les économies sur la main d'œuvre.

Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

 **Dosage des gravillons** : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. A défaut d'indication, il est question de choisir de le mesurer en suivant la procédure du LCPC [12]. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est au alentour de 285 l/m^3 .

 **Dosage du sable** : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

 **Dosage du liant** : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m^3).

 **Dosage de l'eau et du superplastifiant** : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40%. Des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir sont à réaliser.

3.2. Méthode Suédoise [13]

Les suédois ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour atteindre les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et une résistance à la compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire.

3.3. Méthode dite Française (LCPC)

Elle a été proposée par De Larrard et *a.l.*, 1994 au LCPC [14]. Un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

1. les distributions granulaires ;
2. les proportions du mélange ;
3. la compacité propre du mélange granulaire ;
4. la densité apparente des composants à l'état sec;

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante:

1. la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple) ;
2. le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC [14], il pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente ;
3. le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé ;
4. les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi). La viscosité dynamique est fixée de manière arbitraire à 5.104 Pa.s. La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Plus la viscosité d'un béton est *faible*, plus son ouvrabilité est *bonne*.

3.4. Méthode basée sur l'optimisation du volume de la pâte

Son principe 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. Elle a été développée par Oh et al., [15] qui ont proposé à l'époque la détermination de la quantité de pâte en excès à optimiser pour pouvoir obtenir un béton auto-plaçant fluide, tout en évitant le phénomène de blocage. La viscosité du mortier pourrait éviter le blocage aux granulats au droit des armatures.

4. Confection et caractérisation des 'BAP' à l'état frais

4.1. Confection des 'BAP'

Une formulation d'un béton auto-plaçant sera préparée par les étudiants du département de génie civil. Cette composition est préparée à base de matériaux disponibles au niveau du laboratoire. La formulation proposée par les étudiants fera l'objet d'une étude préliminaire basée sur des données archivées disponibles au niveau du laboratoire.

4.1.1. Objectifs

Le but est de confectionner et caractériser des bétons auto-plaçants à l'état frais en se basant sur les directives de la norme européenne EN 206-9 [2], de l'AFGC [3] et de l'EFNARC [4] .

La formulation se fait par tâtonnement en considérant au départ des plages de valeurs dans lesquelles chaque constituant varie. La plupart des formules de 'BAP' sont conçues actuellement expérimentalement. La formulation se fera donc sur la base de multiples formulations testées au

laboratoire du département de génie civil ces dernières années. Le cahier des charges des 'BAP' ne concerne que les propriétés à l'état frais.

Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport **G/S** (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1. Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³. La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (XP P P18-305) [16], soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³. Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation. La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages pour être vérifiée expérimentalement et corrigée par la suite.

4.1.2. Matériel nécessaire

L'essentiel des appareillages nécessaires pour les essais de fabrication du 'BAP' et sa caractérisation à l'état frais se résume en :

- * Bascule d'une précision de 0,1 g et/ou 1 g ;
- * Malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres à axe incliné ;
- * Chronomètre ;
- * Matériel de manutention et de nettoyage.

4.1.3. Matériaux utilisés

Ce sont principalement l'eau de gâchage, le ciment et les granulats. Ensuite, les additions minérales et les adjuvants chimiques sont nécessaires. Les matériaux disponibles à l'utilisation au niveau du laboratoire 'matériaux' du département de génie civil sont principalement :

- * Ciment de classe I ou II avec ou sans ajouts minéraux (de préférence utiliser celui sans ajouts minéraux dans le cas de la variation des paramètres tels que l'effet des ajouts minéraux) ;
- * Fines calcaires (obtenues par broyage du sable concassé 0/3) ;
- * Sable quartzeux (sable de mer) ;
- * Sable concassé 0/3 ;
- * Gravillon 3/8 ;
- * Gravillon 8/15 ;
- * Eau ;
- * Agent viscosant destiné aux mélanges des 'BAP' (Compatibilité parfaite) ou bien un Superplastifiant comme exemple le Medaflow 30 qui est déjà testé et s'adapte aux 'BAP'.

4.1.4. Mode de malaxage

Les étapes suivantes sont à respecter pour la confection des 'BAP' :

- * Introduire les graviers dans le malaxeur ;
- * Introduire les poudres (ciment + additions minérales) dans le malaxeur ;
- * Introduire le sable dans le malaxeur ;

- * Malaxage à sec pendant 1 minute ;
- * Introduire 1/3 de la quantité d'eau et malaxer pendant 30 secondes ;
- * Introduire le superplastifiant avec la quantité d'eau restante (2/3) et procéder à un malaxage de 3 minutes. (Le superplastifiant doit être mélangé avec l'eau).

Tableau 1. Différentes formulations de 'BAP' élaborées par les étudiants lors du TP (au laboratoire).

Composition du Béton en (kg/m ³)	'BAP ₁ ' (A titre indicatif)	'BAP ₂ '	'BAP ₃ '	'BAP ₄ '	'BAP ₅ '	'BAP ₆ '
Ciment (CEM I et/ou II)	350					
Sable Concassé (0/3)	260					
Eau (E)	175					
Sable de mer quartzueux (Smer)	628					
Gravillon (3/8)	204					
Gravillon (8/15)	587					
Fines Calcaires	140					
Adjuvant (Medaflo 30)	10					

4.2. Caractérisation des 'BAP' à l'état frais

Parmi les tests préconisés pour caractériser et valider une formulation de 'BAP', quelques uns d'entre eux sont détaillés dans les paragraphes suivants, selon leurs disponibilités dans le laboratoire 'matériaux' du département de génie civil. Il est nécessaire de rappeler les classes de consistance telles que : étalement au cône d'Abrams, viscosité apparente, étalement à l'anneau, aptitude à l'écoulement (Boîte en L) et résistance à la ségrégation prescrite par les normes et recommandations.

4.2.1. Classes de consistance

Les classes de consistance suivantes s'appliquent aux 'BAP' :

Tableau 2. Classes de consistance selon la norme NF EN 206-9 [2]

Essais	Classes	Valeurs cibles préconisées	
Étalement au cône d'Abrams	<i>SF1</i>	550 à 650	Étalement en mm
	<i>SF2</i>	660 à 750	
	<i>SF3</i>	760 à 850	
Viscosité apparente – t_{500}	<i>VS1</i>	< 2,0	t_{500} (s)
	<i>VS2</i>	2,0	
Viscosité apparente – Entonnoir en V	<i>VF1</i>	< 9,0	Temps (s) relatif à l'essai d'écoulement à l'entonnoir en V
	<i>VF2</i>	de 9,0 à 25,0	
Aptitude à l'écoulement – Boîte en L	<i>PL1</i>	0,80 avec 2 armatures	Taux de remplissage
	<i>PL2</i>	0,80 avec 3 armatures	
Aptitude à l'écoulement – Étalement à l'anneau	<i>PJ1</i>	10 avec 12 armatures	Palier de l'étalement à l'anneau (mm)
	<i>PJ2</i>	10 avec 16 armatures	
résistance à la ségrégation-Essai de stabilité au tamis	<i>SR1</i>	20	Pourcentage de laitance
	<i>SR2</i>	15	

Remarques importantes : Les 4 premières classes définies dans le tableau 2 sont similaires mais ne présente pas une dépendance entre les résultats obtenus.

4.2.2. Principe d'échantillonnage selon la norme NF EN 12350-1 juin 2019 [17]

Le volume de l'échantillon doit correspondre à au moins une fois et demie celui nécessaire pour réaliser les essais. Le prélèvement sera effectué en une seule fois [17].

1,5 fois le volume nécessaire aux essais

4.2.3. Test d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow) selon la norme NF EN 12350-8 [18]

L'essai d'étalement au cône d'Abrams (ou Slump Flow) est utilisé pour caractériser la fluidité du béton auto-plaçant selon les recommandations de l'AFGC [3] et la norme NF EN 12350-8 [18].

4.2.3.1. Matériel nécessaire

Le matériel doit être conforme à la norme NF EN 12350-2 [19]. Il nécessite :

- * **Un cône d'Abrams** conforme à la norme NF EN 12350-2 [19] et un **contrepois cylindrique (Collier)** dont le poids ne dépasse pas les 9 kilogrammes (Fig. 2) s'opposant au soulèvement lors du remplissage quand le test n'est réalisé que par une seule personne ;
- * **Un Plateau** équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane et lisse constituant un carré d'au moins 90 cm de côté, marqué de deux cercles concentriques : le 1er de diamètre 210 mm \pm 1 mm et le 2ème de diamètre 500 mm \pm 1 mm (Fig. 2 et 3), sur laquelle le béton peut être placé (Fig. 3-a). Le centre de la plaque est marqué par une croix ;
- * **Niveau à bulle** pour la vérification de l'horizontalité du plateau avant et après le lancement de l'essai (Fig. 3-a) ;
- * **Récipient** pour contenir le béton à caractériser (volume maximale : 10~15 litres), (Fig. 3-b) ;
- * **Chronomètre**, ayant une précision de 0,1 secondes (Fig. 3-c) ;
- * **Mètre ou réglet**, de longueur minimale de 1000 mm avec des subdivisions maximales ne dépassant pas les 5 mm (Fig. 3-d) ;
- * **Thermomètre** pour la mesure de la température du béton (Fig. 3-e).

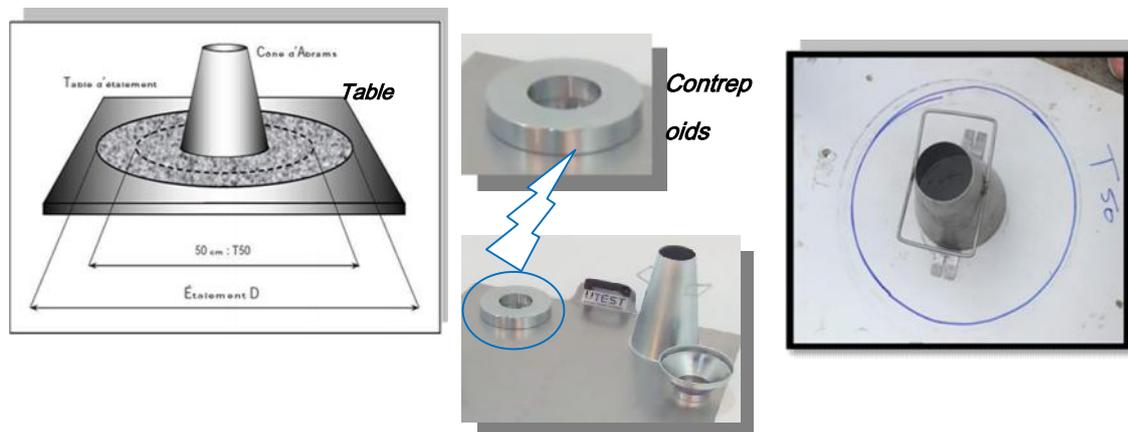


Fig. 2. La plaque d'étalement munie du cône d'Abrams conçue selon la norme NF EN 12350-2 [19].

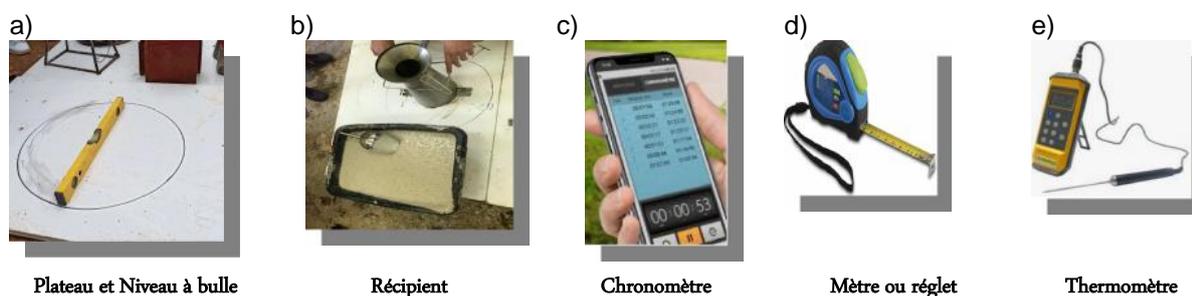


Fig. 3. Matériels nécessaires pour le test d'étalement.

4.2.3.2. Mode opératoire

Le mode opératoire doit respecter la chronologie des démarches illustrées sur la figure 4 et énumérées comme suivantes :

- * S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal ;
- * Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- * Placer et centrer le cône d'Abrams sur une table lisse et sur le cercle déjà tracé sur cette table et ayant la même taille que le diamètre supérieur du cône ;
- * Prélever un échantillon de béton représentatif (1,5 fois le volume nécessaire aux essais) et en une seule fois ;
- * Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- * Retirer l'entonnoir, araser à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide ;
- * Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées ;

- * Mesurer le temps t_{500} désignant le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500 mm ;
- * Une fois que le béton s'est étalé sur la table, il faut mesurer (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux côtés perpendiculaires ;
- * Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : ((68/70cm)). Si les deux valeurs sont différentes de plus de 5 cm, l'essai est invalide et doit être reconduit ;
- * Exprimer le résultat final par la moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant au centimètre supérieur.



Fig. 4. Etapes du déroulement du test d'étalement (du remplissage du cône jusqu'à l'étalement de la galette du béton auto-plaçant sur le plateau)

4.2.3.3. Résultat de l'essai

L'étalement SF est la moyenne de d_1 et d_2 , exprimée à 10 mm près, donnée par l'expression de l'équation 1 (Éq.1) suivante :

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \left(\text{Éq.1} \right)$$

Où :

SF : est l'étalement en mm ;

d_1 : est le plus grand diamètre d'étalement, en mm ;

d_2 : est l'étalement à un angle de 90° par rapport à d_1 , en mm ;

Le temps t_{500} est consigné à 0,5 s près. SF arrondie à 10 mm près.

4.2.3.4. Rapport de l'essai

Le rapport doit inclure les données suivantes selon la norme NF EN 12350-8 [18].

Nom et prénom de l'opérateur	
Identification de l'échantillon de béton BAP	
Le site de réalisation de l'essai	
La date et la durée de l'essai	
La température du béton au moment de l'essai	
L'étalement, SF , à 10 mm près	
Le temps t_{500} à 0.5 s près	
Toute indication de la ségrégation du béton	
Tout écart par rapport à la méthode d'essai normalisée	
Indication du respect et/ou du non respect de la norme NF EN 12359-8 [18]	
Conclusions	

L'essai d'étalement au cône d'Abrams permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton qui se matérialisent par la présence d'une auréole de laitance en périphérie de la galette et l'amoncellement (accumulation-entassement) de gros granulats au centre d'une galette de mortier. Il serait donc judicieux d'illustrer le résultat de cet essai au moyen de photographies comme il est montré dans la figure 5 [20] [21].



Fig. 5. Cas de ségrégation d'un 'BAP' (a) [19], (b) [20].

Les signes de ségrégation comprennent une auréole de pâte de ciment/mortier et du gravillon ségrégué en son centre.

4.2.4. Test d'écoulement à l'anneau (anneau japonais 'J-Rin g') selon la norme NF EN 12350-12 [22]

Le test J-Ring permet d'évaluer l'aptitude à l'écoulement du béton auto-plaçant aux travers des zones confinées comprenant les espaces entre les armatures sans aucune ségrégation ou aucun blocage. Il est utilisé conjointement avec l'essai d'étalement au cône d'Abrams. L'anneau et le cône d'Abrams sont centrés sur la plaque, avant de soulever le cône et avant d'observer l'écoulement du béton à travers les armatures. La méthode est conforme au mode opératoire décrit dans la norme NF EN 12350-8 [18] et NF EN 12350-12 [22].

4.2.4.1. Matériel nécessaire

Il doit être conforme à l'EN 12350-8 [18] avec quelques équipements supplémentaires présentés sur la figure 6 :

- * Anneau à grille étroite disponible en 16 barres en acier lisse \varnothing 18 (Fig. 6 et 7), fixées à un anneau de 300 mm de diamètre pour un espacement de 41 mm ;
- * Anneau à grille large disponible en 12 barres \varnothing 18, fixées à un anneau de 300 mm de diamètre pour un espacement de 59 mm ;
- * Une règle d'arasement de 400 mm.

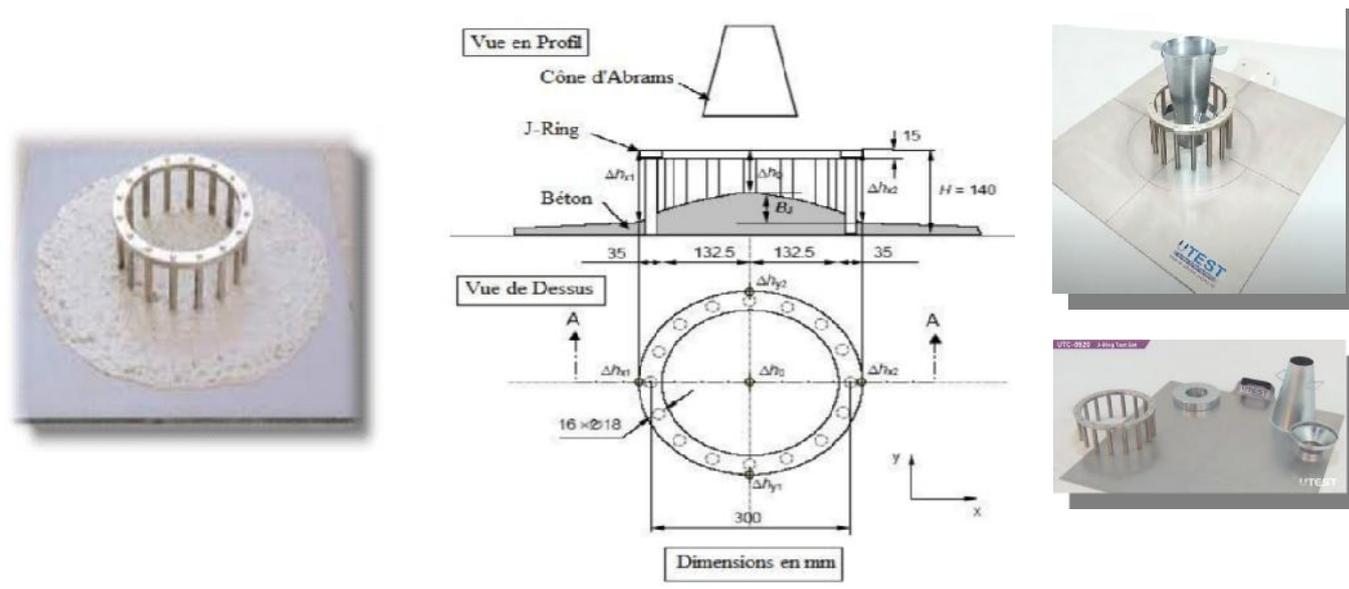


Fig. 6. Matériels nécessaires pour le test d'écoulement à l'anneau (en photographie et en schéma).

4.2.4.2. Mode opératoire

Le mode opératoire doit respecter la chronologie des démarches schématisée sur la figure 7:

- * S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal ;
- * Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- * Placer le cône au centre du cercle de 210 mm sur le plateau en le maintenant dans une position empêchant le béton de s'écouler de la partie inférieure du cône. Il est possible d'utiliser le collier comme contrepoids pour assurer cette dernière tâche ;
- * Placer l'anneau sur la plaque au centre et autour du cône ;
- * Prélever un échantillon de béton représentatif ;
- * Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir et remplir le cône en une seule fois sans le soumettre à aucune agitation ou compactage mécanique, en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône ;
- * Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide et laisser reposer 30 secondes ;
- * Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées dans un laps de temps de 1 à 3 s ;
- * Si la mesure du temps t_{500} est requise, déclencher le chronomètre dès que le cône n'est plus en contact avec la plaque et enregistrer la durée nécessaire avant le premier contact du béton avec le cercle de 500 mm ;

- * Sans déplacer la plaque ou le béton, mesurer le diamètre maximum d'étalement et noter d_1 . d_2 est le diamètre perpendiculaire à d_1 ;
- * Poser la règle sur le sommet de l'anneau et mesurer les différences de hauteur relatives entre le bord intérieur de la règle et la surface du béton à la position centrale Δh_0 et aux 4 positions extérieures (voir Éq. 2.) à l'anneau (Δh_{x1} , Δh_{x2} , Δh_{y1} , Δh_{y2}). A la fin du test, vérifier les signes de ségrégation suite à l'étalement à l'œil nu.



Fig. 7. Étapes du déroulement du test d'étalement à l'anneau (du remplissage du cône jusqu'à l'étalement de la galette du béton auto-plaçant sur le plateau avec l'anneau J-Ring).

4.2.4.3. Expressions des résultats

3.1. Taux de remplissage PJ

Il sera calculé à l'aide de l'équation 2 (Éq. 2) suivante exprimée à 1 mm près :

$$PJ = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0 \quad (\text{Éq. 2})$$

Où :

PJ : est le taux de remplissage, mesuré par le palier de blocage, en mm ;

Δh : sont les hauteurs mesurées, en mm. Ils représentent la différence en hauteur entre le sommet de l'anneau (figure 8) et celui du béton aux points référencés ;

a : 16 barres en acier lisses (fig.) réparties de manière égale (± 0.5 mm).

Note : Il existe aussi des anneaux à 12 Barres en acier lisse réparties de manière égale (± 0.5 mm).

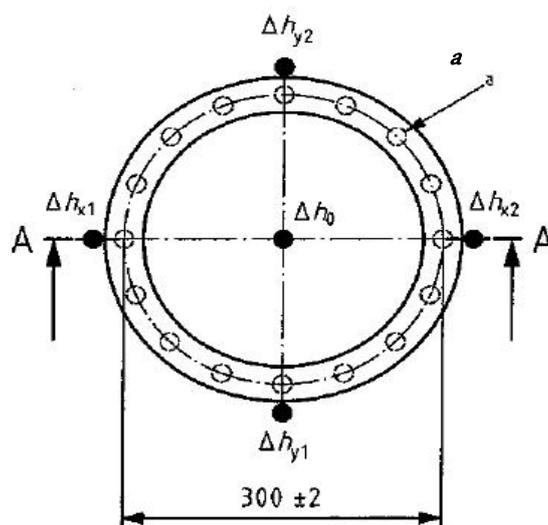


Fig. 8. Anneau à grille étroite (16 barres).

3.2. Étalement SF_J

L'étalement de l'anneau SF_J est la moyenne de d_1 et d_2 exprimée à 10 mm près et donnée par la relation de l'équation 3 (Éq. 3) suivante :

$$SF_J = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{Éq. 3})$$

Où :

SF_J : est l'étalement en mm ;

d_1 : est le plus grand diamètre d'étalement, en mm ;

d_2 : est l'étalement à un angle de 90° par rapport à d_1 , en mm.

3.3. Temps d'écoulement t_{500J}

Le temps d'écoulement à l'anneau t_{500J} est la période comprise entre le moment où le cône est soulevé de la plaque et où le 'BAP' entre en contact pour la première fois avec le cercle de diamètre 500 mm, consigné à 0,5 s près. L'essai d'étalement au cône d'Abrams s'effectue en deux fois (avec et sans le J-Ring). La différence entre les diamètres moyens des deux essais met en évidence la perte de remplissage due à la présence d'armatures. Cette différence ne doit pas être supérieure à 50 mm. Il est également possible de mesurer la différence entre les hauteurs du matériau obtenues à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Un béton recommandé devrait présenter une différence de l'ordre de 10-15 mm.

3.4. Rapport de l'essai

Le rapport doit inclure les données suivantes selon la norme NF EN 12350-12 [22].

Nom et prénom de l'opérateur	
Identification de l'échantillon de BAP	
Le site de réalisation du test	
La date et la durée du test	
La température du béton au moment du test	
L'utilisation de l'anneau à grille étroite ou large	
Le taux de remplissage P_f , mesuré par le palier de blocage à 1 mm près	
L'étalement, SF_f , à 10 mm près	
Le temps t_{500} à 0.5 s près	
Toute indication de la ségrégation du béton	
Tout écart par rapport à la méthode d'essai normalisée	
Indication du respect et/ou du non respect de la norme NF EN 12359-12 [22]	
Conclusions	

4.2.5. Test de l'écoulement à la boîte en L (L-Box) selon la norme NF EN 12350-10 [23]

Ce test concerne la ségrégation dynamique. Il permet d'évaluer l'aptitude à l'écoulement du béton auto-plaçant en milieux confinés (au travers des zones confinées), comprenant les espaces entre les barres d'armatures sans aucune ségrégation ou aucun blocage. Il permet aussi de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement du béton.

Le banc d'essai comporte deux variantes, à savoir un test avec deux barres et un autre avec trois barres. Ces dernières simulent un plus fort pourcentage d'armatures.

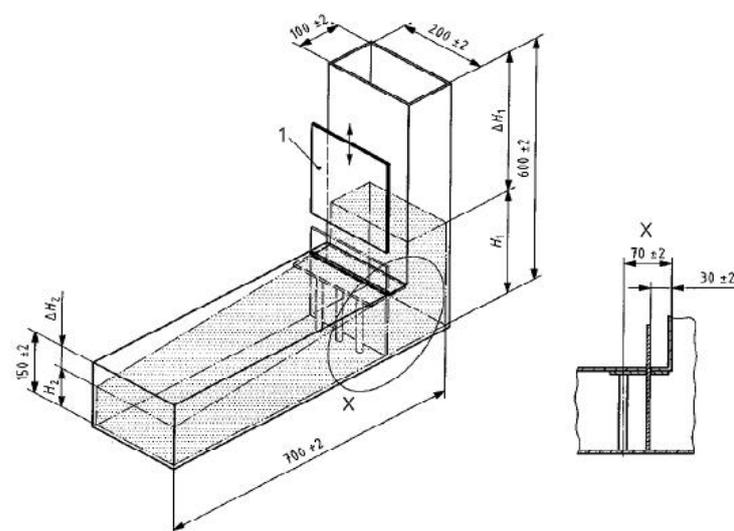
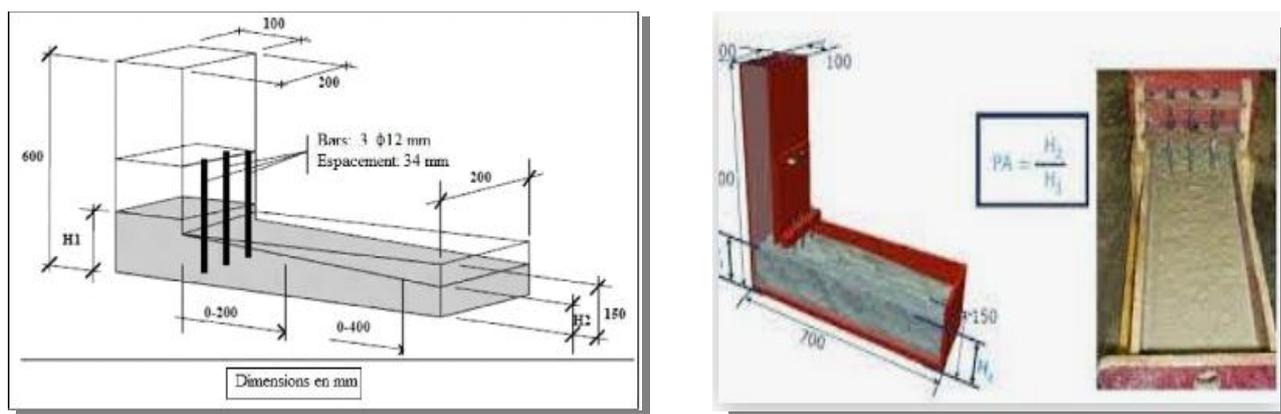


Fig. 9. Schéma de la boîte en L (L-Box) selon la norme NF EN 12350-10 [23].

La réalisation de l'essai de l'écoulement à la boîte en L, est basée sur le remplissage d'un volume donné de béton frais s'écoulant horizontalement à travers les espaces entre les barres d'armatures lisses conçues verticalement. La figure 9 illustre les hauteurs du niveau de béton dans la partie verticale (H_1) et à l'extrémité de la partie horizontale (H_2), ces hauteurs sont mesurées et le rapport (H_2/H_1) est calculé par la suite. Il constitue la mesure de la capacité d'écoulement ou de blocage du BAP.

4.2.5.1. Matériel nécessaire

Le matériel doit être conforme à la norme NF EN 12350-10 [23] et il nécessite :

- * Une boîte en L (L-Box en anglais) ayant une forme en L et respectant les dimensions données par la norme NF EN 12350-10 [23]. Elle doit être rigide, lisse et plane et ne devant pas réagir avec la pâte de ciment.

4.2.5.2. Mode opératoire

Le mode opératoire doit respecter la chronologie des démarches suivantes :

- * Sur une surface plane et bien horizontale (l'horizontalité est vérifiée par le niveau à bulle), il faut poser la boîte en **L** humidifiée immédiatement avant d'effectuer l'essai.
- * Fermer entre les parties verticales et horizontales. Ensuite déverser le béton dans la trémie verticale de la boîte en **L** et laisser reposer une minute.
- * Vérifier les signes de ségrégation avant et après le remplissage de la boîte en **L**.
- * Ouvrir en complet la trappe coulissante en une seule fois sans vibration ou secousses.
- * A la fin de l'écoulement, mesurer l'affaissement du béton ΔH_1 (en mm) dans la partie verticale (prendre trois mesures). La même démarche est adoptée pour déterminer ΔH_2 (en mm) dans la partie horizontale (à l'extrémité de la boîte).
- * Les valeurs de H_1 et H_2 sont déduit à partir des dimensions de la boîte en **L** normalisée (figure 8 et 9) présentées dans la page précédente.

4.2.5.3. Expression des résultats

L'expression du taux de remplissage est donnée par l'équation 4 (Éq. 4) suivante:

$$PL = \frac{H_2}{H_1} \quad (\text{Éq. 4})$$

Où :

PL : est le taux de remplissage mesuré par le test à la boîte en **L** ;

H_1 : est la hauteur moyenne du béton dans la partie verticale de la boîte, en (mm) ;

H_2 : est la hauteur moyenne du béton à l'extrémité de la partie horizontale de la boîte, en (mm).

4.2.5.4. Rapport de l'essai

Le rapport doit inclure les données suivantes selon la norme NF EN 12350-10 [23].

Nom et prénom de l'opérateur	
Identification de l'échantillon de BAP	
Le site de réalisation de l'essai	
La date et la durée de l'essai	
La température du béton au moment de l'essai	
Toute indication de la ségrégation du béton	
Le type d'essai utilisé (deux barres ou trois barres)	
Le taux de remplissage <i>PL</i> , à 0,05 près	
Tout écart par rapport à la méthode d'essai normalisée	
Indication du respect et/ou du non respect de la norme NF EN 12359-10 [23]	
Conclusions	

4.2.6. Test de l'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel) selon la norme NF EN 12350-9 [24]

Cet essai consiste à observer l'écoulement d'un volume de 12 litres de béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où l'on aperçoit le jour par l'orifice. Il a été développé par Ozawa et *al.*, (1995) cité par Sedran 99 [25].

Le 'BAP' 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. Un temps d'écoulement trop long et un flux discontinu lors d'un essai au 'V-Funnel' (Fig. 10) peuvent indiquer une séparation des granulats de la matrice et la formation de voûtes bloquant l'écoulement.

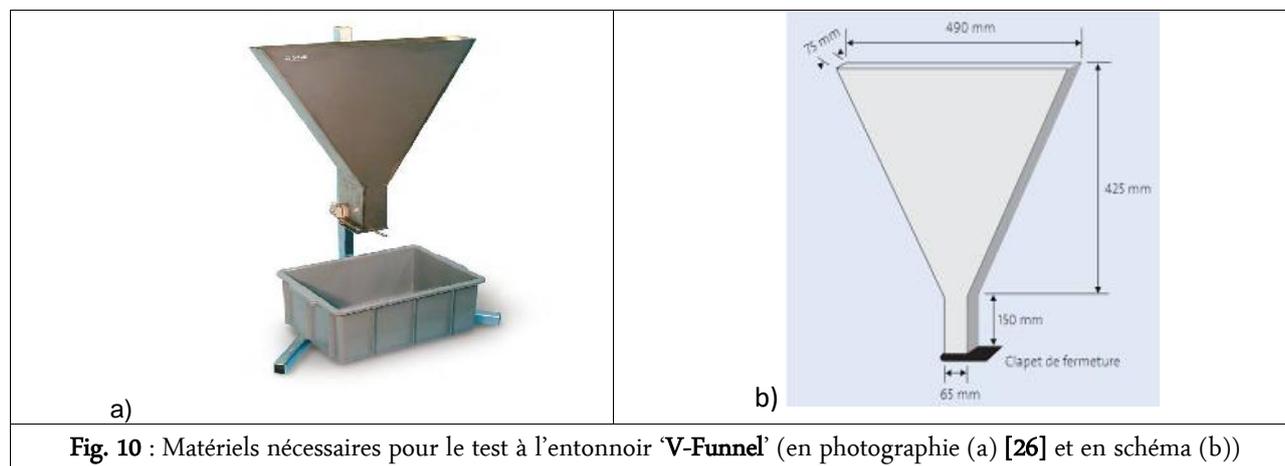


Fig. 10 : Matériels nécessaires pour le test à l'entonnoir 'V-Funnel' (en photographie (a) [26] et en schéma (b))

4.2.6.1. Matériel nécessaire

Le matériel doit être conforme à la norme NF EN 12350-9 [24] et il nécessite :

- * Un entonnoir en V, équipé d'une trappe à articulation étanche avec un déclenchement à la base. L'entonnoir est soutenu par un cadre.
- * Un récipient de 12 litres ;
- * Un chronomètre précis à 0,1 secondes ;
- * Une règle d'arasement de la surface du béton ;
- * Prévoir au 12 litres de béton au minimum pour remplir l'entonnoir.

4.2.6.2. Mode opératoire

Le mode opératoire doit respecter la chronologie des démarches suivantes (Fig. 11):

- * Une fois avoir nettoyé et humidifié l'entonnoir, il faut fermer la trappe et déverser l'échantillon de béton en une seule fois sans agitation ;
- * Araser le béton et nettoyer les surfaces de part et d'autres ;
- * Le récipient déjà placé en dessous de l'entonnoir près à accueillir le béton déversé à travers la trappe ;
- * Ouvrir la trappe rapidement et mesurer le temps t_v ;

Le temps est défini comme étant le temps entre l'ouverture de la trappe et le moment d'apercevoir le récipient en le visant à travers de la trappe. t_v est la durée d'écoulement à l'entonnoir en V.



Fig. 11. Etapes du déroulement du test à l'entonnoir 'V-Funnel' (du remplissage de l'entonnoir jusqu'à l'écoulement total du béton à travers la trappe).

4.2.6.3. Rapport de l'essai

Le rapport doit inclure les données suivantes selon la norme NF EN 12350-9 [24].

Nom et prénom de l'opérateur	
Identification de l'échantillon de BAP	
Le site de réalisation du test	
La date et la durée du test	
La température du béton au moment du test	
la durée d'écoulement à l'entonnoir en V à 0,5 s près	
Tout écart par rapport à la méthode d'essai normalisée	
Indication du respect et/ou du non respect de la norme NF EN 12359-9 [24]	
Conclusions	

4.2.7. Test de la stabilité au tamis selon la norme NF EN 12350-11 [27]

La résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Cet essai consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance d'un échantillon de béton pour que le béton

auto-plaçant 'BAP' soit qualifié vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier [2-3]. Il permettra ainsi de compléter les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [3].

Le test consiste à remplir le sceau de **10 litres** et à laisser le béton couvert et au repos pendant **15 minutes**. Un échantillon de ce béton (**4,8 kg ± 0,2 kg**) est versé à travers le tamis **de 5 mm** posé sur le fond de ce tamis, et laissé **02 minutes**, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis (Fig. 12).

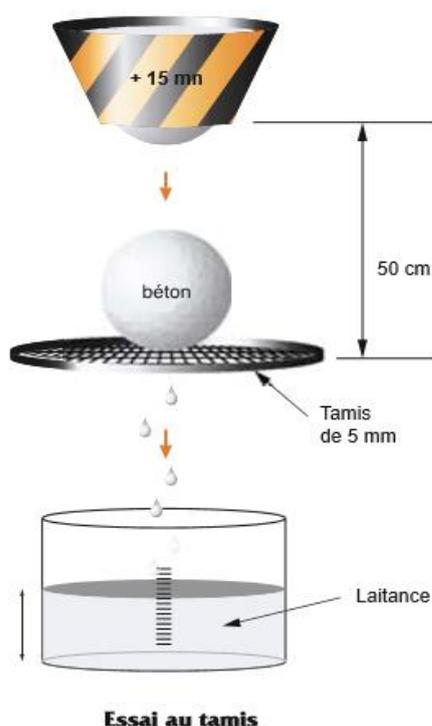


Fig. 12. Schéma et photographie [28] descriptifs du test de stabilité au tamis (GTM).

4.2.7.1. Matériel nécessaire

Ce type d'essai nécessite le matériel suivant :

- * Seau de **10 litres** avec un diamètre intérieur de 240 ± 30 mm ;
- * Tamis d'ouverture **5 mm** de diamètre 315 mm (tamis à tôle perforée selon la norme NF EN 933-2) plus fond de tamis;
- * Bascule d'une précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg.

4.2.7.2. Mode opératoire

Le mode opératoire est décrit selon les recommandations de l'AFGC [3] et la norme EN 206-9 [2] qui comporte les étapes suivantes :

- * Après le malaxage du béton au laboratoire, il faudrait verser directement 10 litres de béton dans le seau. Le temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement est inférieur à 30 secondes ;
- * Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation et attendre 15 minutes ;
- * Peser le fond et le tamis à vide, ensuite peser le fond seul ;
- * Poser (tamis + fond) sur la bascule et tarer ;
- * Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes ;
- * Verser sur le tamis et au centre du tamis un poids de béton égal à $4,8 \pm 0,2$ kg, pour une hauteur de chute du béton de 50 ± 5 cm ;
- * Noter la masse réelle lue de l'échantillon ;
- * Attendre 2 minutes, ensuite retirer le tamis et le fond de tamis ;
- * Faire le zéro et peser le fond avec la laitance. Le poids de la laitance est obtenu par la relation :

$$\text{Poids (laitance)} = \text{Poids (fond + laitance)} - \text{Poids (fond)}$$

4.2.7.3. Expression des résultats

Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon, en arrondissant au pourcent près.

Ce pourcentage *SR* de laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donné par la relation de l'équation 5 (Éq. 5) exprimant ainsi la stabilité du béton.

$$SR\% = \frac{\text{Poids (laitance)}}{\text{Poids (échantillon)}} \cdot 100 \quad (\text{Éq. 5})$$

* Il faut noter la présence éventuelle de ressuage.

4.2.7.4. Rapport de l'essai

Le rapport doit inclure les données suivantes selon la norme NF EN 12350-11 [27].

Nom et prénom de l'opérateur	
Identification de l'échantillon de béton BAP	
Le site de réalisation du test	
La date et la durée du test	
La température du béton au moment du test, à 1 °C près	
La présence éventuelle d'eau de ressuage, après une période de repos de 15 min	
Le pourcentage de laitance SR, à 1% près	
Tout écart par rapport à la méthode d'essai normalisée	
Indication du respect ou du non respect de la norme NF EN 12350-11 [27]	
Conclusions	

5. Travail demandé

- 1/ Procéder à la confection du béton auto-plaçant 'BAP' ;
- 2/ Déterminer la masse volumique théorique du béton ;
- 3/ Déterminer la masse volumique du béton à l'état frais ;
- 4/ Comparer les deux résultats des masses volumiques ;
- 5/ Renseigner les tableaux présentés dans ce polycopié après avoir déterminé les caractéristiques du béton auto-plaçant confectionné pour chaque essai effectué ;
- 6/ Répéter la mesure de l'étalement ainsi que le t_{500} pour les temps suivant : 5, 15, 30 et 60 minutes ;
- 7/ Répéter la mesure de l'écoulement à la boîte en L (L-Box) pour les temps suivant : 5, 15, 30 et 60 minutes ;
- 8/ Commenter les résultats obtenus et comparer avec les limites données par la norme NF EN 206-9 ;
- 9/ Tracer les courbes des évolutions de l'étalement en fonction du temps, du t_{500} en fonction du temps et de l'écoulement à la boîte en L H_2/H_1 en fonction du temps ;
- 10/ Analyser et conclure ;
- 11/ Quelles sont les solutions appropriées dans les cas suivants ?
 - * L'étalement < 550 mm.
 - * $H_2/H_1 < 0,5$.
 - * Temps d'écoulement au V- Funnel < 30 s
 - * Stabilité au tamis : P = 45%.
- 12/ Décrire d'autres tests de caractérisation à l'état frais tels que l'essai à la boîte en U et le test permettant de déterminer la teneur en air occlus ;
- 13/ Porter des conclusions constructives (riches en critiques et analyses des résultats d'essais) à votre travail.

6. Conclusion

Ce polycopié permettra à l'étudiant de comprendre le travail pratique effectué au laboratoire, et de saisir comment fabriquer un béton auto-plaçant avec les matériaux disponibles sur le marché.

Les objectifs de chaque test ont été clairement reportés. Ils apporteront à l'étudiant plus de simplicité pour le discernement des manipulations pour chaque caractéristique rhéologique du 'BAP' formulé par les étudiants.

Tout au long de la rédaction de ce document, nous avons tenté de chercher la simplicité dans le but de le rendre compréhensible pour l'étudiant et/ou doctorant en génie civil en particulier et aux lecteurs en général.

Il est important de noter que pour l'ensemble des documents étudiés et cités dans le paragraphe des références, qu'il est nécessaire d'approvisionner le laboratoire 'Matériaux' du département de génie civil par de nouveaux matériels et équipement qui permettront à l'étudiants de s'intéresser à la pratique efficacement.

Nous n'avons pu analyser l'ensemble de ce sujet très vaste. Cependant, il nous semblerait intéressant, dans l'avenir, d'explorer et de compléter cette partie par une deuxième partie qui traitera de la caractérisation des bétons auto-plaçants à l'état durci en décrivant les tests de durabilité effectués sur ces bétons.

"Il faut avoir beaucoup étudié pour savoir peu."

De Montesquieu

7. Références bibliographiques

- [1] Afnor NF EN 206–1., 'Béton – Part 1: Spécification, performance, production and conformity'; April 2018.
- [2] Afnor NF EN 206–9., 'Béton – Part 9: Règles complémentaires pour le béton auto-plaçant 2010.
- [3] Association Française de Génie Civil 'AFGC'. Les BAP: recommandations provisionnels pour l'emploi des Bétons Auto-Plaçants, 2008, pp. 64 pages.
- [4] EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete, Fernham, EFNARC, 2002.
- [5] Michel Guerin et Christian Bernardini. «Le projet national bétons auto-plaçants (B@P)». Pages 51-62 | Published online: 04 Oct 2011. <https://doi.org/10.1080/12795119.2002.9692427>.
- [6] Turcry.P., 'Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : Influence de la Formulation'. Thèse doctorale, université de Nantes, 2004.
- [7] François CUSSIGH. 'Qu'est-ce qu'un BAP? Les Bétons Auto-Plaçants'. 10 août 2019. Techniques de l'ingénieur. Article de référence | Réf : C2217 v2.
- [8] Patrick Guiraud. Atouts des BAP. Septembre 2016.<https://www.infociments.fr/betons/atouts-des-bap>.
- [9] Ph Turcry, Ahmed Loukili. Différentes approches pour la formulation des bétons auto-plaçants : Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques. Revue Française de Génie Civil, Taylor & Francis, 2003, 7 (4), pp.425-450. [ff10.1080/12795119.2003.9692503](https://doi.org/10.1080/12795119.2003.9692503)ff. [ffhal-01006744](https://doi.org/10.1080/12795119.2003.9692503).
- [10] Ahmed Loukili, «Les bétons auto-plaçants». Livre- 23 décembre 2010. Collection Mécanique et ingénierie des matériaux. Editeur Hermes Science Publications. 262 pages.
- [11] Okamura H. et al., 'self-compacting high performance concrete'. Proceeding of the fifth sec vol.3, pp.2381-2388, 1995.
- [12] MM. Vincent Lédée, François de Larrard, Thierry Sedran, Frédéric Brochu., 'Essai de compacités des fractions granulaires à la table à secousses - Mode opératoire Méthode d'essai N°61'. LCPC. ISSN 1167-489X. Juillet 2004.
- [13] Petersson Ö., Billberg P. and Van B.K., 'A model for Self-Compacting Concrete', International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, (1996).
- [14] DE Larrard F. et al, «Mix design of self compacting concrete», RILEM International Conference on production methods and workability of concrete, pp.439-451, Glasgow, 3-5 juin (1996).
- [15] Oh S.G., Noguchi T., Tomosawa F. (1999), «Toward mix design for rheology of self compacting concrete», Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, pp. 361-37,
- [16] XP P18-305., Béton prêt à l'emploi. E : Concrete — Ready mixed concrete, D : Beton — Transport beton
- [17] NF EN 12350–1., Essais pour béton frais - Partie 1 : prélèvement et appareillage commun. juin 2019.
- [18] NF EN 12350–8., Essai pour béton frais - Partie 8 : béton auto-plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams, Novembre 2010.
- [19] NF EN 12350–2., Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement. Juin 2019.
- [20] Patricia Geretto, L'optimisation du squelette granulaire. <http://doc.lerm.fr/loptimisation-squelette-granulaire/>. 2028. Site institutionnel du Lerm. Consulté le 17/01/2021.

- [21] Melisent Roger., BETON AUTOPLACANT Spécificités Formulation Performances. <https://slideplayer.fr/slide/3466160/>. Consulté le 16/01/2021.
- [22] NF EN 12350–12., Essai pour béton frais - Partie 12 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'anneau. Novembre 2010.
- [23] NF EN 12350–10., Essai pour béton frais - Partie 10 : béton auto-plaçant - Essai à la boîte en L, Novembre 2010.
- [24] NF EN 12350–9., Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V Novembre 2010.
- [25] Sedran T., Rhéologie et rhéométrie des bétons. Applications aux bétons auto-nivellants, Thèse du LCPC, 1999.
- [26] Japanese society of civil engineering (JSCE) "Guide to construction of high flowing concrete engineering" Gihoudou Pub, Tokyo, Japan (1998).
- [27] NF EN 12350–11., Essai pour béton frais - Partie 11 : béton auto-plaçant - Essai de stabilité au tamis, Novembre 2010.
- [28] Les bétons auto-plaçants : https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/36_fr.pdf. Consulté le 16/01/2021.