

## **Résumé**

Le but de cette étude est de voir l'effet de l'utilisation du sable de fonderie (SNVI-Rouiba) en tant que sable (par substitution partielle du sable naturel 0-5mm) sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton autoplaçant. Un travail expérimental a été mené pour évaluer les caractéristiques à l'état frais et durci des bétons autoplaçants en présence du sable de fonderie à des rapports de substitution (sable de fonderie à 0, 10, 30 et 50% par poids du sable). Les résultats montrent que ce type de déchet peut être considéré comme source de matériau sable et être utilisé comme granulats fins jusqu'à 50% pour produire des bétons fluides en particulier les bétons autoplaçants. Les bétons autoplaçants élaborés à 50% de sable de fonderie présentent des caractéristiques à l'état frais et durcis acceptables pour une éventuelle utilisation dans la construction.

## **Abstract**

## *Introduction générale*

Selon la réglementation en vigueur, les sables de fonderie usée sont classés comme déchets non dangereux et, par conséquent, il a une valeur économique intrinsèque importante, en particulier en termes de fer et d'acier. Récemment, un certain nombre de travaux de recherches appliquées, y compris le brevet, visant à étudier la faisabilité de réutiliser des sables de fonderie usés dans d'autres secteurs industriels que ferreux. Le produit le plus adapté semble être celui de l'industrie des matériaux de construction, en raison de l'emploi de sable de fonderie usé dans plusieurs matériaux de construction, comme: ajout au clinker pour la production ciment Portland, le béton traditionnel, les briques, les conglomerats de bâtiments, la base de la route, le remplissage structurel, le remplissage écoulé, etc. En outre, un peu de sable peut être utilisé comme additif haut de gamme pour les matériaux industriels, tels que les plastiques, pour fournir des textures et des couleurs spécifiques.

Les données quantitatives détaillées sur les diverses applications bénéfiques du sable de fonderie n'ont pas été bien citées dans la littérature. Récemment, une recherche préliminaire a été menée par des auteurs soulignant qu'une petite quantité de sable de fonderie usé est encore utilisée dans le clinker pour produire le ciment Portland composé. Cependant, selon l'association américaine du Ciment Portland au sable de fonderie, qu'on utilise de nombreux fours à ciment nord-américains.

En outre, les aspects environnementaux et la compatibilité ont été étudiées afin de souligner les conditions préalables à l'utilisation du sable de fonderie usé. A cet effet, le but de ce travail est de voir l'effet de l'utilisation du sable de fonderie (SNVI-Rouiba) en tant que sable (par substitution partielle du sable naturel 0-5mm) sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton autoplaçant. Pour cela, cette étude présente un travail expérimental sur la formulation et caractérisation physico-mécanique des bétons autoplaçants à base de ce type de déchet (sable de fonderie à 0, 10, 30 et 50% par poids du sable).

Le présent manuscrit est subdivisé en cinq (5) chapitres, répartie en deux chapitres pour la synthèse bibliographique et trois autres chapitres pour la partie expérimentale. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les bétons autoplaçants. Les sables de fonderie ainsi que leurs utilisations dans le domaine des matériaux de construction sera présenté dans le chapitre II. En ce qui concerne la partie expérimentale, un chapitre est consacré à la

caractérisation des matériaux utilisés dans ce travail, dont nous présentons les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés (ciment, filler calcaire, superplastifiant, déchets de sable de fonderie, sable et gravillon). Le chapitre IV est consacré à l'élaboration des bétons autoplacants à base de sable de fonderie en tant que sable (par remplacement partielle du sable naturel). La composition et méthode de formulation des bétons étudiés seront aussi présentées dans ce chapitre. Les résultats des différents essais réalisés et leurs interprétations seront ainsi présentés dans le dernier chapitre de la partie expérimentale.

Enfin, une conclusion générale clôtura ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus par notre travail.

# Sommaire

<b>Résumé</b> .....	4
<b>Introduction générale</b> .....	5
<b>Chapitre I : les bétons Autoplaçants (BAP)</b> .....	12
1 Introduction .....	12
2 Définition .....	12
2.1 Avantages et inconvénients .....	13
3 Constituants des bétons autoplaçants .....	13
3.1 Le ciment .....	13
3.2 Les granulats .....	13
3.3 L'eau de gâchage .....	14
3.4 Additions minérales .....	14
3.5 Les superplastifiants .....	14
4 Essais de Caractérisation des BAP à l'état frais .....	15
4.1 Essai d'Étalement (Slump Flow) .....	15
4.2 Essais de boîte en L .....	15
4.3 Essai d'entonnoir (V-Funnel) .....	16
4.4 Essai d'étalement modifié (J-Ring) .....	17
4.5 Essai de stabilité au tamis .....	18
5 Essais de caractérisation des BAP à l'état durci .....	18
5.1 Essais destructifs .....	18
5.1.1 Propriété mécanique des BAP .....	18
5.1.2 Essais non destructifs .....	19
6 Classification des BAP .....	21
7 Méthodes de formulation des BAP .....	22
7.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier .....	22
<b>Chapitre II : les sables de fonderies</b> .....	24
1 Définition de sable de fonderie .....	24
2 Origine .....	24
3 Caractéristiques de sables de fonderie .....	24
3.1 Caractéristiques physiques .....	25
3.2 Caractéristiques mécanique .....	26
3.3 Caractéristique chimiques .....	26
4 Types de sables de fonderie .....	26
4.1 Sable naturel .....	27
4.2 Sable silico-argileux .....	27
4.3 Sable à prise chimique .....	27
5 Mode d'emploi des sables .....	28
5.1 Sable à noyaux .....	28
5.1.1 Moulage en sable .....	28
5.1.2 Moulage mécanique en sable .....	30
5.1.3 Les possibilités du moulage mécanique en sable .....	32
5.1.4 Moulage en sable procédés particuliers .....	32
5.1.5 Moulage en carapace : (Corning ou Shell-moulin) .....	34
6 Options de gestion actuelles .....	35
6.1 Recyclage .....	35
6.2 Mise au rebut .....	36
6.3 Sources de marché .....	36
<b>Chapitre III: Méthodologie et Choix des Matériaux</b> .....	37

1	Objectif du travail.....	37
2	Caractéristique des matériaux utilisés .....	37
2.1	Ciment .....	37
2.1.1	Avantages produit .....	37
2.1.2	Applications recommandées.....	38
2.1.3	Caractéristiques chimiques.....	38
2.1.4	Caractéristiques minéralogiques.....	38
2.1.5	Caractéristiques physiques du ciment .....	38
2.1.6	Caractéristiques mécaniques du ciment .....	38
2.2	Les fines.....	39
2.3	Les granulats.....	39
2.3.1	Le sable .....	39
❖	Caractéristiques du sable : les propriétés physiques de sable (0/3) sont présentées dans le tableau 5 .....	39
2.3.2	Gravie .....	40
❖	Caractéristiques physiques.....	40
❖	Analyse granulométrique et classe granulaire .....	41
2.4	Superplastifiant.....	42
2.4.1	Domaines d'application.....	42
2.4.2	Caractères généraux .....	42
2.4.3	Conditionnement .....	43
2.4.4	Stockage .....	43
2.4.5	Caractéristiques .....	43
2.4.6	Conditions d'application .....	43
2.4.7	Propriétés et effets .....	43
2.4.8	Délai de conservation .....	44
2.5	Eau de gâchage .....	44
2.6	Déchet du sable de fonderie.....	44
2.6.1	Caractéristiques des sables de fonderie .....	45
	<b>Chapitre IV : Formulation des bétons autoplaçants</b> .....	46
1	Introduction .....	46
2	Composition du béton autoplaçant.....	46
3	Calcul des proportions.....	47
4	Optimisation de la composition de BAP .....	47
4.1	Formulation de béton autoplaçant (BAP) .....	47
4.2	Formulation de béton auto plaçant (BSF10) avec 10% de sable de fonderie.....	48
4.3	Formulation de béton auto plaçant (BSF30) avec 30% de sable de fonderie.....	49
4.4	Formulation de béton auto plaçant (BSF50) avec 50% de sable de fonderie.....	49
	Tableau 21 : Les quantités des constituants en kg pour 1m <sup>3</sup> du béton.....	50
5	Préparation de la gâchée.....	50
6	Conservation des éprouvettes.....	51
	<b>Chapitre V : Résultats et Interprétations</b> .....	53
7	Caractérisations des bétons autoplaçants à l'état frais .....	53
7.1	Fluidité (Essai d'étalement).....	53
7.2	Capacité de remplissage (Essai de boîte en L) .....	54
7.3	Stabilité des bétons (Essai de stabilité de tamis) .....	56
8	Caractérisations des bétons autoplaçants à l'état durci .....	57
8.1	Résistance à la compression des bétons.....	57
8.2	Résistance à la traction par flexion.....	59
8.3	Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique).....	60

<i>Conclusion générale</i> .....	62
<b>Bibliographie</b> .....	63

## *Liste des figures*

Figure 1 : Essai d'étalement (Slump Flow) [2].	15
Figure 2 : Essais de boîte en L [10].	16
Figure 3 : Essai de l'entonnoir en forme de « v » [2].	17
Figure 4 : Essai d'étalement modifié (J-Ring) [15].	17
Figure 5 : Méthode de tamis [16].	18
Figure 6 : Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique.	20
Figure 7 : Sable de fonderie non transformé	25
Figure 8 : Sables verts d'une industrie du fer gris.	26
Figure 9 : Les possibilités du moulage mécanique en sable.	32
Figure 10 : Exemple de moule en moule plein.	33
Figure 11 : Recyclage du sable de fonderie.	35
Figure 12 : Sable utilisé dans notre recherche.	39
Figure 13 : Analyse granulométrique de sable 0/3 selon la norme NF EN 9331.	40
Figure 14 : Analyse granulométriques par tamisage de gravier 8/16.	42
Figure 15 : Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude.	44
Figure 16 : Analyse granulométrique sable de fonderie.	45
Figure 17 : Malaxeur utilisé pour le béton autoplaçant	51
Figure 18 : Moules de béton autoplaçant	
Figure 19 : Conservation des éprouvettes	52
Figure 20 : Essais d'étalement sur le béton autoplaçant frais.	53
Figure 21 : Fluidité des bétons étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie.	54
Figure 22 : Essais de boîte en L sur le béton autoplaçant frais.	55
Figure 23 : Capacité de remplissage des bétons étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie.	55
Figure 24 : Essai de stabilité de tamis sur le béton autoplaçant frais.	56
Figure 25 : Indice des ségrégations des bétons étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie.	57
Figure 26 : Essai de compression.	57
Figure 27 : Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (3, 7, et 28 jours).	58
Figure 28 : Essai de traction par flexion.	59
Figure 29 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à 28 jours	59
Figure 30 : Appareil d'ultrason.	60
Figure 31 : Evolution de coefficient d'élasticité dynamique des bétons en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (3, 7, et 28 jours).	61

## Listes des tableaux

Tableau 1: Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [17].....	20
Tableau 2 : Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R (MPa) et la vitesse ultrasonique V (km/s, *: m/s) [19].....	20
Tableau 3 : Classification des BAP [AFGC]. .....	21
Tableau 4 : Mode d'emploi de sable de fonderie.....	28
Tableau 5 : types de moulage en sable de fonderie.....	28
Tableau 6 : Composition chimique du ciment par fluorescence X. ....	38
Tableau 7: Composition minéralogique du ciment par diffraction des rayons X. ....	38
Tableau 8: Caractéristiques physiques du ciment. ....	38
Tableau 9 : Caractéristiques mécaniques du ciment. ....	38
Tableau 10: Caractéristiques physiques du sable concassé (0/3) selon la norme NF EN 933-1. ....	39
Tableau 11: Analyse granulométrique par tamisage du sable 0/3 selon NF EN 933-1. ....	40
Tableau 12 : Caractéristiques physiques du gravier.....	41
Tableau 13 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/16 selon NF EN 933-1. ....	41
Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/16 selon NF EN 933-1 (suite Tableau 14).....	41
Tableau 15: Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie.....	45
Tableau 16 : Analyse granulométrique du déchet (la norme NF P 18-560).....	45
Tableau 17: Composition du BAP (Béton témoin). ....	48
Tableau 18 : Composition du BSF10 à 10% de sable de fonderie. ....	49
Tableau 19 : Composition du BSF30 à 30% de sable de fonderie. ....	49
Tableau 20 : Composition du BSF50 à 50% de sable de fonderie. ....	50
Tableau 21 : Les quantités des constituants en kg pour 1m <sup>3</sup> du béton.....	50
Tableau 22: L'essai de l'étalement.....	54
Tableau 23 : Essai de boîte en L.....	55
Tableau 24 : Essais de stabilité de tamis. ....	56
Tableau 25 : Essais d'écrasement par compression des bétons étudiés effectués à 3, 7, et 28 jours.....	58
Tableau 26 : Essais de traction par flexion des bétons étudiés effectués à 28 jours .....	59
Tableau 27 : Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons étudiés effectués à 3, 7, et 28 jours. ....	60

## Chapitre I : les bétons Autoplaçants (BAP)

*Ce chapitre est consacré aux généralités sur les bétons autoplaçants, leurs constituants et propriétés essentielles et leurs particularités du point de vue propriétés à l'état frais et durci leurs ainsi que leurs définitions et leurs méthodes de formulation.*

### 1 Introduction

Les bétons autoplaçants de l'anglais Self Compacting concrete (S.C.C) marquent une nouvelle étape dans la technologie des bétons, leur atout une mise en œuvre facile qui engendre toute une chaîne d'avantage.

Le béton auto-compactant est également dénommé béton autoplaçant pour les parois verticales, ou encore autonivelant pour les parois horizontales, mais l'appellation la plus courante en Algérie est : béton autoplaçant notée BAP [1].

Ce premier chapitre fait l'objet d'une initiation au béton autoplaçant, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP.

### 2 Définition

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

Pour obtenir un béton fluide il ne s'agit pas d'ajouter de l'eau, au contraire, une telle manipulation conduit à des phénomènes de ségrégation entraînant une chute des performances. Il s'agit de trouver la composition optimale entre les différents constituants (gravier, sable, ciment, eau, ajouts et adjuvants), et de garantir l'absence de ségrégation et de ressuage [2].

## 2.1 Avantages et inconvénients

Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels :

- Absence de vibration qui réduit les nuisances sonores.
- Bétonnage des zones fortement ferraillées et à géométrie complexe.
- Pénibilité de travail moindre.
- Réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte.

Cependant, ces avantages certains inconvénients :

- Augmentation du cout des matières premières (addition, adjuvant).
- Modification des outils de fabrication (outils de mise en place).

## 3 Constituants des bétons autoplaçants

Un béton est constitué de deux parties principales : les granulats et la pâte. Par rapport aux bétons classiques, les BAP ont deux constituants supplémentaires qui doivent être présents dans la composition du béton [3].

### 3.1 Le ciment

En principe, tous les types de ciment normalisés conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment portland (contenant seulement le clinker) nous donne toute latitude pour varier et contrôler les quantités introduites des additions minérales.

### 3.2 Les granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle [4]. Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans

un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le  $D_{max}$  augmente [5]. Ainsi, le  $D_{max}$  des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

### 3.3 L'eau de gâchage

L'eau employée pour le gâchage de béton doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [6]:

- physiquement (pas de déchets solides, minéraux ou organiques).
- chimiquement (valeur limitée de la quantité de sels dissous, ce qui exclut en général l'usage de l'eau de mer) [7].

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

### 3.4 Additions minérales

Depuis l'antiquité. Ces pouzzolanes désignent un grand nombre d'additions minérales aux origines diverses, mais qui présentent tous, le fait d'être fins et de réagir en présence d'eau et de chaux. De nos jours, des quantités considérables de plusieurs types de ces additions continuent d'être utilisées.

Nous présentons ci-dessous les différentes additions minérales éventuelles qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP :

1. Les fillers calcaires
2. Les pouzzolanes naturelles
3. Le laitier de haut fourneau
4. La fumée de silice
5. Les cendres volantes, ...

### 3.5 Les superplastifiants

Ce sont des réducteurs d'eau à haute efficacité, et se présentent généralement sous forme de liquide. Ils sont composés de longues molécules organiques de masse élevée. Les plus couramment utilisés sont les sels de sodium ou de calcium du poly-naphtalène sulfoné, et les sels de sodium de la poly-mélamine sulfonée. Les copolymères acrylate-ester ou polyacrylates ont récemment été introduits sur le marché.

Le mode d'action des superplastifiants est extrêmement complexe. Il peut être expliqué comme suit:

Lorsqu'ils sont en contact avec un milieu aussi polaire que l'eau, les grains de ciment, qui présentent un grand nombre de charges opposées (positives et négatives) sur leur surface, tendent à s'agglomérer sous forme d'amas (floculation). Par conséquent, cette floculation piège un certain volume d'eau entre les grains de ciment (eau captive) qui n'est plus disponible pour assurer une bonne maniabilité au béton.

#### 4 Essais de Caractérisation des BAP à l'état frais

Plusieurs essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) [9]. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues, sur site, les essais de référence pour valider une formule de BAP.

##### 4.1 Essai d'Étalement (Slump Flow)

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure 1). Le béton est introduit dans le cône sans compaction. On mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. La valeur d'étalement comprise entre 600 et 800 mm. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facile et son soulèvement est empêché.

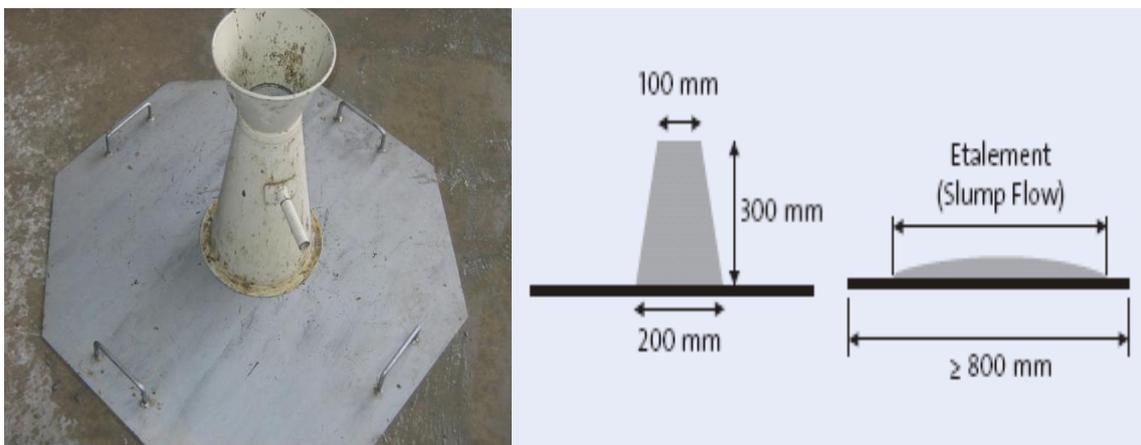


Figure 1 : Essai d'étalement (Slump Flow) [2].

##### 4.2 Essais de boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Le mode opératoire est exprimé d'après [AFGC] comme suit :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 15 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H1$  et  $H2$  et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H2/H1$ .

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

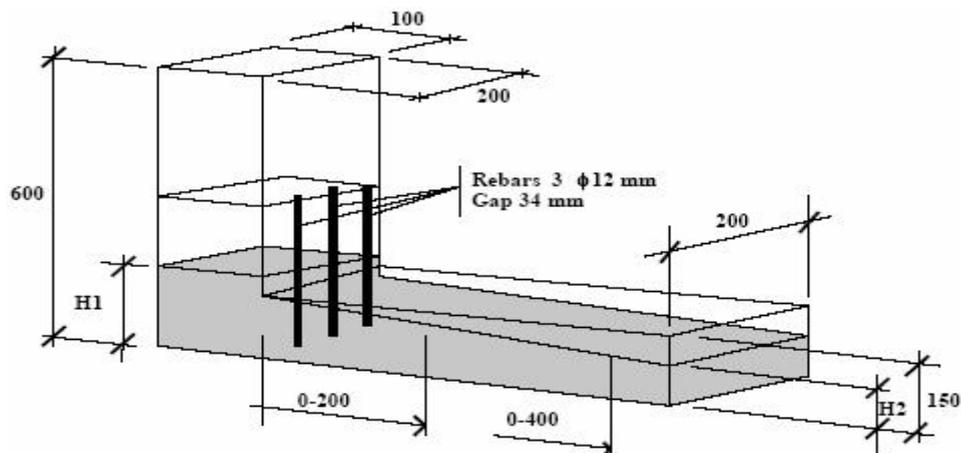


Figure 2 : Essais de boîte en L [10].

### 4.3 Essai d'entonnoir (V-Funnel)

Cet essai consiste à mettre une quantité de béton frais dans l'entonnoir en forme de « V » (figure 3) le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement totale du béton. D'après [11] et [12], un temps d'écoulement à l'entonnoir en forme « V » inférieur à 6 secondes est recommandé pour pouvoir qualifier le béton d'autoplaçant. Moins le béton stable, plus l'écoulement est perturbé par les collisions inter-granulaires et durée de l'écoulement est longue [13] [14].

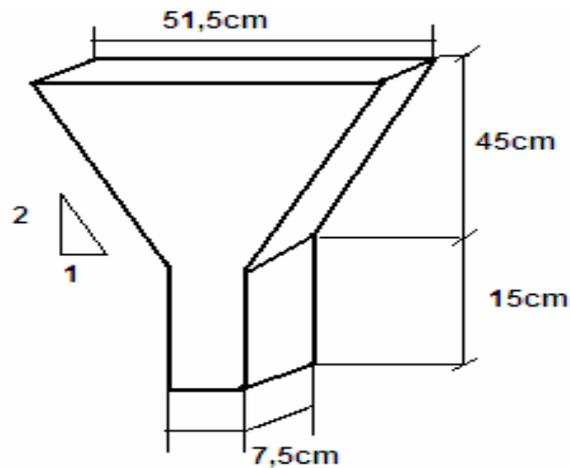


Figure 3: Essai de l'entonnoir en forme de « v » [2].

#### 4.4 Essai d'étalement modifié (J-Ring)

L'essai d'étalement modifié fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers des barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armatures 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le BAP satisfait pleinement à la performance recherchée de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur de l'anneau.



Figure 4 : Essai d'étalement modifié (J-Ring) [15].

#### 4.5 Essai de stabilité au tamis

Cette méthode consiste à déposer deux litre de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture (Figure 5). Après cinq minutes on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité para rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2 litres, donne l'indice de ségrégation du notre béton.

$$\text{Indice de ségrégation} = (M_{\text{passant}} / M_{\text{initial}}) * 100 = P$$

- Si  $0\% < P < 15\%$  : stabilité satisfaisante.
- Si  $15\% < P < 30\%$  : stabilité critique.
- Si  $30\% < P < 100\%$  : stabilité mauvaise.

On vise indice de ségrégation d'au plus 30% pour un béton autoplaçant.

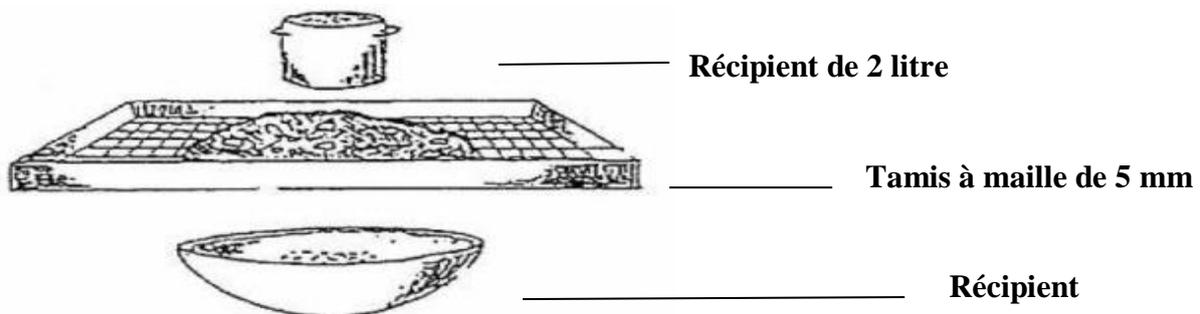


Figure 5 : Méthode de tamis [16].

### 5 Essais de caractérisation des BAP à l'état durci

On distingue deux types d'essais : essais destructifs et essais non destructifs

#### 5.1 Essais destructifs

##### 5.1.1 Propriété mécanique des BAP

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme la plupart des bétons directement liées à la quantité du squelette granulaire et au rapport eus efficace sur ciment, elles dépendent aussi une de la compression du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistance jusqu'à des BAP à hautes performance (80 à 100 MPa au 28<sup>ème</sup> jours).

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

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction par flexion.

#### ❖ Essai de compression

L'essai de compression est l'essai le plus connu des essais mécaniques. Il s'effectue sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

Cet essai consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette. Les essais effectués sur les différents bétons à différents âges (3, 7, 28 jours) [16].

La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma_c = P / a^2$$

$\sigma_c$  : la résistance à la compression (MPa)

$P$  : la charge appliquée ;

$a$  : le coté de l'éprouvette cubique

#### ❖ Essai de traction par flexion

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28) cm. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion et est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture. La résistance à la traction par flexion correspond à contrainte maximale calculée par la formule suivant :

$$\sigma_t = 1.8 P / a^2$$

$\sigma_t$  : La résistance à la traction par flexion (MPa)

### 5.1.2 Essais non destructifs

#### ❖ Ultrason (*Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique*)

Cet essai est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, alors la vitesse d'impulsion peut être déterminée. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité comme il a été décrit dans le tableau 2 [17, 18].

**Tableau 1 :** Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion [17].

Vitesse de propagation des impulsions (m/s)	Qualité du béton
Supérieure à 4500	Excellente
3500 - 4500	Bonne
3000 - 3500	Moyenne
Inférieure à 3000	Douteuse

**Figure 6 :** Appareil de mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique.

La vitesse de propagation des ondes ultra-sonique permet de déduire la résistance du matériaux (tableau 2) et autres propriétés mécanique.

**Tableau 2 :** Corrélations proposées par différents auteurs entre la résistance à la compression R (MPa) et la vitesse ultrasonique V (km/s, \*: m/s) [19].

Auteur	Fonctions de régression	Plage de Résistance	Spécimens	Granulats
Ravindrajah et al. (1988)	$R=0.060 \exp(1.44V)$	15.0 à 75.0	Cube 100mm	Granite Dmax=20mm
Almeida (1993)	$R=0.0133 V^{5.543}$ $R=0.011 V^{5.654}$	40.1 à 120.3	Cube 150mm	Granite Dmax=25mm
Gonçalves* (1995)	$R=0.02 V - 65.4$	18.0 à 42.0	$R = 0.02 V - 65.4$	Carotte 70mmx70mm
Pascale et al* (2000)	$R=10-28 V^{8.1272}$	30.0 à 150.0	Cube 150mm	Calcaire Dmax=15mm
Qasrawi (2000)	$R=36.72 V - 129.077$	6.0 à 42.0	Cube 150mm	variable
Soshiroda et Voraput (1999)	$R_{28}=44.52 V^{1-126.83}$ $R_{28}=54.18 V^{28-206.27}$	20.0 à 65.0	Cube 150mm	gravier
Soshiroda et al. (2006)	$R_{28}=1.941 \exp(0.815V^1)$ $R_{28}=0.356 \exp(1.110V^3)$ $R_{28}=0.131 \exp(1.293V^7)$ $R_{28}=0.043 \exp(1.498V^{28})$	12.45 à 96.2	Cube 150mm	gravier
Phoon et al (1999)	$R = 124.4 V - 587.0 + \square$	35.0, 55.0 et 75.0	Cube 150mm	granite Dmax=20mm

<b>Hobbs et Kebir (2007)</b>	$R=2.289V^2 - 48.024V+24.271$	20.0 à 49.0	Cube 150mm	gravier Dmax=20mm
<b>Elvery et Ibrahim (1976)</b>	$R = 0.012 \exp(2.27 V) \square 6.4$	15.0 à 60.0	Cube 100mm	Gravier Dmax=19mm
<b>Yun et al (1988)</b>	$R = 0.329 V - 1065$	5.0 à 30.0	Carotte 150mmx300mm	gravier Dmax=25mm Dmax=40mm

❖ *Scléromètre (marteau de rebondissement de Schmidt)*

Le scléromètre est principalement un appareil de contrôle de la dureté d'une surface de béton durci. Il travaille sur le principe que le rebondissement d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface. Plus la distance de rebondissement est grande, plus la surface essayée est dure. Il y a peu de rapport théorique apparent entre la résistance du béton et l'indice de rebondissement du marteau. Cependant, avec des limites, des corrélations empiriques ont été établies entre les propriétés de résistance et l'indice de rebondissement [20].

## 6 Classification des BAP

Les BAP sont classés en trois catégories suivant leur domaine d'utilisation. Le classement s'effectue suivant la valeur de l'intervalle d'écoulement noté « I » qui désigne le plus petit espace à travers lequel le béton doit s'écouler pour remplir correctement l'élément à bétonner, le type d'application (horizontale ou verticale) et l'épaisseur (dans le cas d'application horizontale). Cette classification selon l'AFGC est résumée dans le tableau 3 [21].

**Tableau 3 :** Classification des BAP [AFGC].

		Application Horizontale				Application verticale	
		Epaisseur ≤ 30mm		Epaisseur ≥30mm			
La longueur max de cheminement		≤ 5m	5 — 10m	≤ 5m	5 — 10m	≤5m	5 — 10m
Intervalle d'écoulement	$I \geq 100$	1		2a	2b	2a	2b
	$80 \leq I \leq 100$	2a	2b	2a	2b	2a	2b
	$I < 80$	3a	3b	3a	3b	2a	3b

Trois catégories se dégagent :

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

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

L'intervalle d'écoulement I est supérieur ou égale à 80mm.

- La catégorie (3) concerne les BAP utilisés pour la réalisation d'ouvrages fortement ferrillés voire exigus et pour lesquels l'intervalle d'écoulement I est inférieur à 80mm.

Pour une application, épaisseur et intervalle d'écoulement donnés, on distingue des sous-classes (2a, 2b et 3a, 3b) fonction de la longueur maximale de cheminement horizontale du BAP dans le coffrage

## 7 Méthodes de formulation des BAP

Différentes techniques de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde.

Parmi les techniques de formulation les plus répandues, nous citons :

- La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires,
- La méthode basée sur l'optimisation des mortiers,
- La méthode chinoise.
- La méthode basée sur l'optimisation de la pâte.

### 7.1 Méthode basée sur l'optimisation du mortier

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs Japonais [22, 23, 24, 25], est également, nommée Méthode Japonaise. Elle permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, surdosés en liant et économiquement peu viables.

La méthode repose sur les concepts suivants :

- Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume des grains et le volume total du système (grains + vides)) afin de minimiser les risques de blocage.
- Volume du sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume total de mortier.

- Rapport  $\frac{E}{\text{Poudre}}$  et dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers en effectuant des essais d'étalements au mini-cône et au V-Funnel. Ces essais permettent de calculer deux paramètres :  $T_m = \frac{(D)^2 - (D_0)^2}{(D_0)^2}$  et  $R_m = \frac{10}{t}$  où D est l'étalement,  $D_0$  est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs [26, 27, 28] montrent que pour un BAP :  $T_m = 5$  et  $R_m = 1$ .

## Chapitre II : les sables de fonderies

*Ce présent chapitre consiste à donner des généralités sur les différents types de sables de fonderie qui existent dans l'industrie de métallurgie. De même nous présentons ici ; un état de l'art sur leur utilisation en tant que sable dans la composition des bétons.*

### 1 Définition de sable de fonderie

Les sables de fonderie sont des sous-produits de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièce métallique, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tel que l'argile ou les liants organiques. Ce sable peut être recyclé mais le nombre de ses réutilisations de celui-ci est limité (29). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie ; il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. La réglementation française, en l'occurrence l'arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de réutilisation de ces sables: « les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produit à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5mg/kg de sable rapporté à la matière sèche »(30).

### 2 Origine

Le sable de fonderie est un sable, de granulométrie uniforme, ayant une haute qualité qui est lié par un liants pour former des moules afin de mouler des pièces en métal ferreux ou non ferreux (31).

### 3 Caractéristiques de sables de fonderie

Un sable de fonderie doit satisfaire deux exigences fondamentales qui sont :

- La mise en forme au contact d'un modèle mère en épousant tous ses détails.

- La conservation de cette forme jusqu'à la solidification complète du métal.

D'autres propriétés sont également nécessaires :

- La réfractaire, car le sable doit présenter une température de fusion supérieure à la température de coulée de l'alliage considéré.
- La perméabilité, qui permet l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte de moule ou générés lors de la coulée.
- L'absence des réactions molles métal susceptibles de créer des défauts d'inclusions solides ou gazeuses dans le métal constituant la pièce.
- La facilité de décochage, afin de pouvoir séparer facilement la pièce obtenue de son moule.

### 3.1 Caractéristiques physiques

Le sable de fonderie est généralement de forme quasi-angulaire à rond. Après avoir été utilisé dans le processus de fonderie, un nombre important d'agglomérations de sable se forment. Lorsque ces dernières s'effondrent, une forme particulière des grains de sable apparaît.

Les sables verts sont généralement noirs, ou gris, et non verts. Le sable lié chimiquement est généralement de couleur beige clair ou blanc cassé. (Figure 7 et figure 8) montrent respectivement le sable de fonderie non traité et le sable vert (32).



**Figure 7 :** Sable de fonderie non transformé



**Figure 8** : Sables verts d'une industrie du fer gris.

### 3.2 Caractéristiques mécanique

La mise en forme au contact d'un modèle mère en épousant tous ses détails. Le serrage du sable est effectué par un effort manuel ou mécanique (pression, secousse, vibration, projection mécanique ou pneumatique),

La conservation de cette forme jusqu'à la solidification complète du métal ; cela sous-entend des caractéristiques mécaniques suffisantes pour résister à la pression statique du métal liquide ainsi qu'à la pression dynamique (afin d'éviter les phénomènes d'érosion) sans pour autant faire obstacle au retrait du métal en cours de solidification.

### 3.3 Caractéristique chimiques

La réfractait, car le sable doit présenter une température de fusion supérieure à la température de coulée de l'alliage considéré, la perméabilité, qui permet l'évacuation des gaz contenus dans l'empreinte du moule ou générés lors de la coulée, l'absence des réactions moule-métal susceptibles de créer des défauts d'inclusions solides ou gazeuses dans le métal constituant la pièce, la facilité de décochage, afin de pouvoir séparer facilement la pièce obtenue de son moule.

## 4 Types de sables de fonderie

Il existe trois types du sable :

- Le sable naturel ;
- Le silico-argileux ;
- Le sable à prise chimique ;

À 5% d'impuretés (oxyde de fer, matières organiques, etc.).

Le fait de jouer sur ces pourcentages permet de faire varier les qualités demandées au sable.

#### 4.1 Sable naturel

Il est directement extrait de carrière et se compose de silice, d'argile en forte proportion et de poussières. C'est la version "naturelle" du sable silico-argileux.

#### 4.2 Sable silico-argileux

Les sables silico-argileux, dits aussi synthétiques par opposition aux sables naturels, sont constitués d'un réfractaire (Silice) aggloméré par de l'argile activée par de l'eau. Des additifs sont ajoutés à ce sable afin d'en améliorer son comportement à la coulée.

Les constituants du sable sont :

- Le sable siliceux ;
- L'argile, souvent du type bentonite ;
- Les additifs carbonés ;
- L'eau et d'autres éléments éventuellement.

#### 4.3 Sable à prise chimique

Il est composé de silice (pour l'aluminium et les fontes) ou de chromite (pour les aciers), de résines (environ 1 % à 2 % de la masse du sable) et d'une catalyse (5 à 60 % de la masse de résine).

La "durée de vie" de ce sable préparé (temps pendant lequel il peut être travaillé avant durcissement) est ajustable en fonction de la taille des moules à réaliser. Généralement de l'ordre de 5 minutes, elle peut être allongée jusqu'à 15 min pour le moulage de grosses pièces.

Il existe plusieurs types de résines, comme la « Puranique » ou le « PEP-SET » (Polyuréthane).

Les sables utilisés en fonderie doivent répondre à un certain nombre d'impératifs.

- Reproduire fidèlement la pièce modèle ;
- Avoir une surface aussi fine que possible ;
- Ne pas se désagréger lors de l'extraction du modèle ;
- Résister à la température de coulé élevé du métal ;
- Résister à l'érosion par le métal liquide, lors de la coulée ;
- Ne pas s'opposer au passage des gaz produits pendant la coulée ;
- Résister suffisamment aux efforts de retrait du métal ;

- Permettre d'un décochage aisé ;

## 5 Mode d'emploi des sables

**Tableau 4 :** Mode d'emploi de sable de fonderie

Désignation	procédé	Qualité	Contrainte	commentaire
Moulage à vert	Pas de séchage du sable avant la coulée	Pièce précises.	Risque de trempe superficielle.	Procédé économique
Moulage à vert grillé	Consiste en un séchage superficiel de l'empreint	Précision acceptable.	Risque de trempe atténuée	Dureté du moule augmentée.
Moulage en sable étuvé	Le moule est passé au four avant utilisation	Pièces moins précise	Pas de risque de trempe superficielle	Prix de revient élevé. Empreinte très résistante

### 5.1 Sable à noyaux

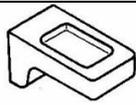
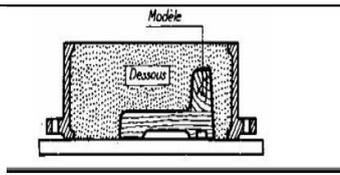
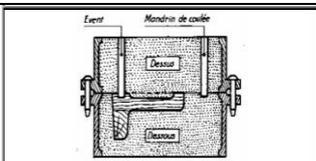
Obtenue à partir de sable blanc auquel on incorpore un agglomérant (huile de lin, collagène, mélasse, etc.), ils sont séchés ou étuvés après mise en forme. Ils doivent résister aux efforts et manutention tout en étant facilement découvrables. Ils doivent avoir une compressibilité suffisante, permettant au retrait du métal de se manifester

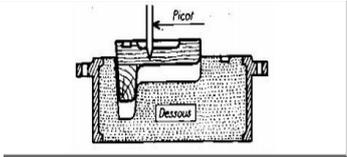
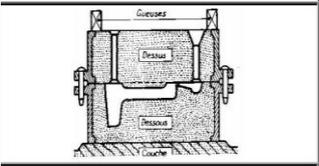
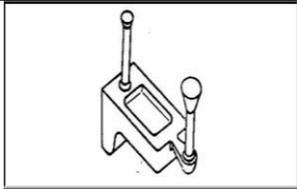
Normalement sans pour cela trop résister sous pinède provoquer des tensions voire des criques dans la pièce (33).

#### 5.1.1 Moulage en sable

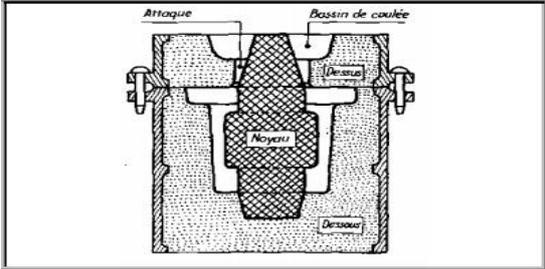
##### 5.1.1.1 Gamme générale

**Tableau 5 :** types de moulage en sable de fonderie.

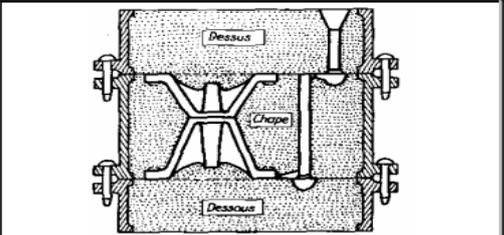
	Pièce à réaliser avec modèle « tel que pièce »
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en place du modèle</li> <li>- Remplissage du châssis de dessous</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Retournement du châssis</li> <li>- Saupoudrage du joint</li> <li>- Mise en place du châssis de dessus, du mandrin de coulée, des événements, etc.</li> <li>- Remplissage du dessus</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ouverture du moule</li> <li>- Extraction du modèle</li> <li>- Réalisation du canal et de la poche de coulée.</li> </ul>	
	<p>Remoulage, puis coulée du métal liquide.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décochage</li> <li>- Ebarbage, sablage</li> <li>- Contrôle</li> <li>- Traitement thermique éventuel</li> </ul>	

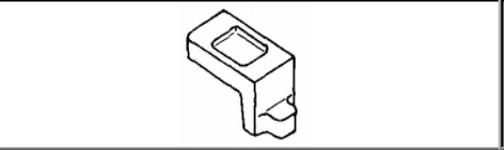
**5.1.1.2 Moulage avec noyaux**

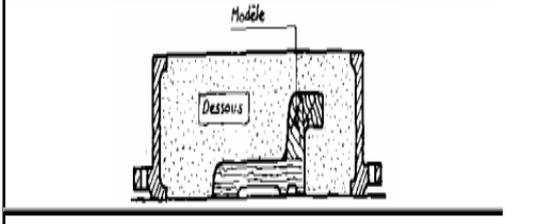
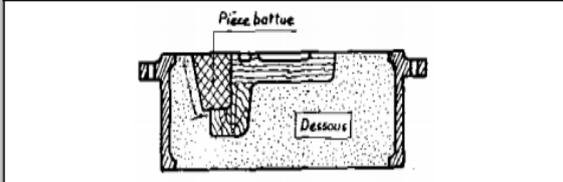
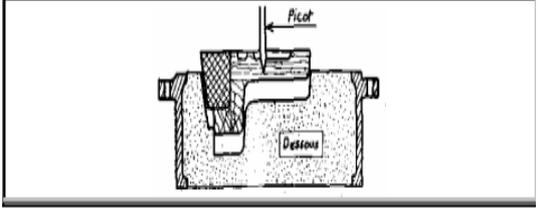
<p>Pratiqué lorsque les formes de la pièce s'opposent à un moulage avec modèle « tel que pièce » (évidements, parties en contre dépouille). Les noyaux sont confectionnés à part, et mis en place dans le moule avant le remoulage</p>	
--	---

**5.1.1.3 Moulage avec chape**

	<p>Les formes de certaines pièces présentant plusieurs sections minima, nécessitent pour leur moulage, l'emploi d'un châssis supplémentaire appelé « chape ». Les modèles utilisés doivent être obligatoirement démontables suivant la section minimum.</p>
---	---

**5.1.1.4 Moulage avec chape**

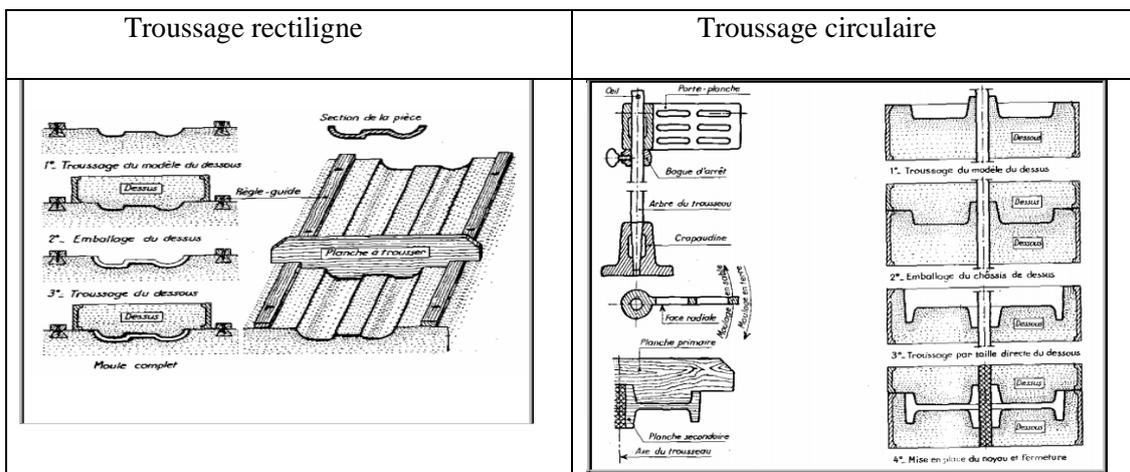
	<p>Ce procédé est utilisé pour certains cas particuliers de pièces présentant des parties en contre dépouille (bossage, etc.). Ex : pièce avec oreilles</p>
---	---

<p>- emballage du dessous</p>	
	<p>- Retourner le châssis et pratiquer une cavité descendant jusqu'à l'oreille qui s'oppose au démoulage. - Saupoudrer de talc avant de reboucher avec du nouveau sable.</p>
<p>- Démoulage du modèle et de la pièce battue. - Cette dernière sera replacée dans sa cavité lors du remoulage.</p>	

**5.1.1.5 Moulage au trousseau**

Ce procédé est utilisé pour la réalisation de pièces volumineuses de forme rectiligne, circulaire, curviligne, etc.

Le modèle habituel est remplacé par un ensemble de planches qui permettent au mouleur d'engendrer les surfaces du moule. Economiquement, ce procédé n'est applicable que pour un nombre de pièces limité (réalisation du moule trop longue) (33).



**5.1.2 Moulage mécanique en sable**

Il importe, en moulage série, que les moules soient:

- Réalisés le plus rapidement possible Prix.
- Rigoureusement semblables Exactitude, tolérances.

On utilise à cet effet, des machines à mouler et des plaques modèles.

### 5.1.2.1 Machines à mouler

Elles permettent d'assurer un serrage identique du sable, d'un moule à l'autre, et un démoulage aisé.

Le procédé de serrage, variable selon les machines, peut être effectué :

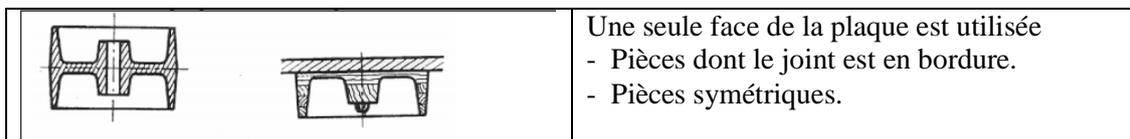
- Par pression Appliqué au moulage de faible hauteur.
- Par secousses inconvénient de serrage pratiquement nul à la partie supérieure du moule.
- Par vibrations et secousses Serrage efficace.
- Par projection Serrage régulier dans toutes les zones(33).

### 5.1.2.2 Les plaques modèles

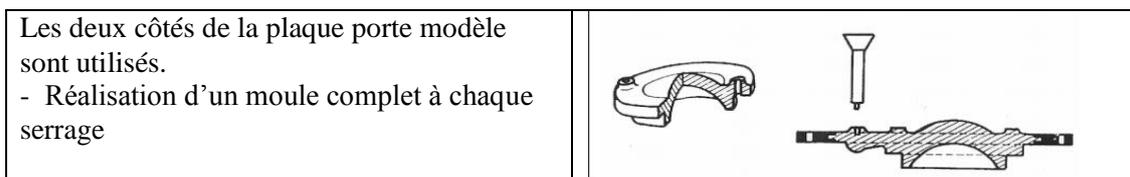
Confectionnées en bois, plâtre, métal, plastique selon l'importance de la série, elles permettent non seulement d'obtenir les formes de la pièce, mais également la surface du joint (plan de joint) et les éléments de coulée (canal, évents, masselottes) (33).

On distingue :

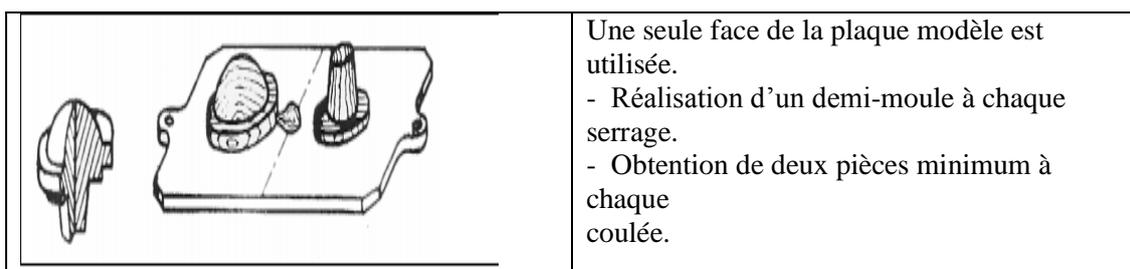
Les plaques modèles simples face (33)



Les plaques modèles doubles face (33)



Les plaques modèles réversibles (33)



### 5.1.3 Les possibilités du moulage mécanique en sable

Il permet la réalisation de toute pièce, quelle que soit sa forme, mais il est limité par la capacité des machines (4 m<sup>2</sup>).

Les cadences de moulage sont très élevées :

- 100 à 200 moules par heure selon dimensions des pièces.
- 400 moules par heure avec plaque modèle double face.

1. Serrage châssis inférieur
2. Retournement
3. Noyautage
4. Remoulage noyau
5. Serrage châssis supérieur
6. Fermeture du moule
7. Élaboration du métal liquide
8. Coulée
9. Tunnel de refroidissement
10. Déchargement puis décochage
11. Retour châssis

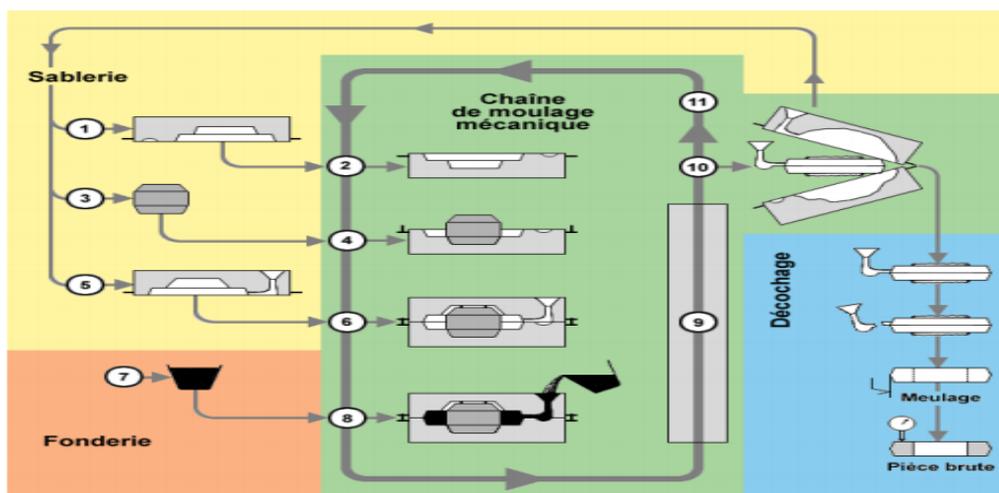


Figure 9 : Les possibilités du moulage mécanique en sable.

### 5.1.4 Moulage en sable procédés particuliers

#### 5.1.4.1 Procédé SHAW

On utilise des sables fins, très réfractaires (zircons, etc...), additionnés d'éther de silicium en solution alcoolique, qui en présence d'un acide, libère de la silice pure colloïdale jouant le rôle de liant. Le sable ainsi préparé est liquide, coulé sur les modèles, il fait prise et se solidifie en conservant quelques instants une certaine élasticité qui facilite l'extraction des

modèles. Avant coulée, moule et noyaux sont chauffés, afin de leur donner la cohésion maximale. Ce procédé est utilisé pour le moulage des aciers spéciaux et des pièces de précision (33).

#### 5.1.4.2 Moulage au CO<sub>2</sub>

Le sable utilisé pour la confection des noyaux et des moules, est à base de silicate de soude. Soumis à un courant de gaz carbonique, il durcit presque instantanément par réaction chimique. Les moules et les noyaux sont très résistants et ce procédé se prête bien au moulage de très grosses pièces(33).

#### 5.1.4.3 Moulage en moule plein

On utilise des modèles en mousse plastique (polystyrène expansé : 92% Carbone, 8% d'hydrogène). On laisse le modèle dans le moule, celui-ci se gazéifiant au contact de l'alliage en fusion.

Procédé coûteux (un modèle par moule), on l'utilise pour le moulage de pièces unitaires à moyenne série et pour les pièces de grandes dimensions (bâtis, etc.) (33).

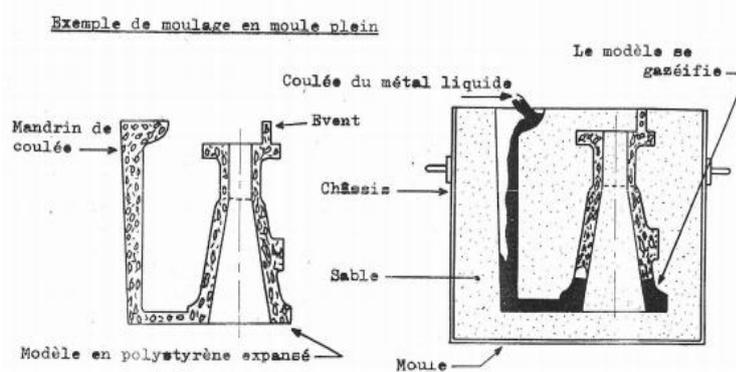


Figure 10 : Exemple de moule en moule plein.

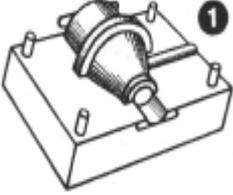
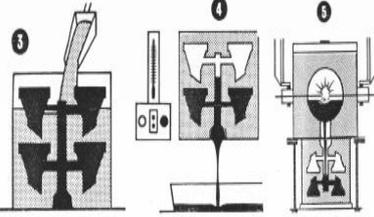
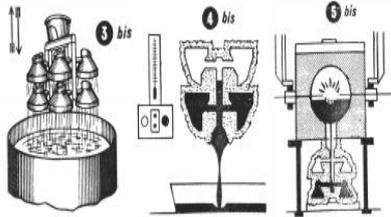
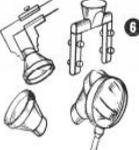
#### 5.1.4.4 Moulage à la cire perdue

Ce procédé repose sur l'utilisation de moules sans joint, dont les empreintes sont obtenues par fusion (90 à 100°) des modèles en cire. Une application plus récente du procédé, consiste en l'obtention de moules spéciaux par trempages successifs des modèles dans un bain de matière réfractaire dont l'épaisseur atteindra 7 à 10mm. Ceux-ci sont ensuite placés dans un four porté progressivement à 950° pour cuisson (33).

#### Caractéristiques

- Possibilité de coulée de tous alliages.
- Poids des pièces : Quelques grammes à 30Kg (fusion à l'air) Quelques grammes à 20Kg (fusion sous vide)

- Tolérances :  $\pm 0,1\text{mm}$  en qualité courante  $\pm 0,03\text{mm}$  en qualité précise
- Etat de surface Ra 2 à  $3,5\mu$  (33)

Fabrication d'un moule		Fabrication d'une carapace
1 Reproduction des cires 2 Montage des cires en grappes 3 Enrobage des grappes 4 Evacuation de la cire 5 Coulée du métal		
		
6 Séparation des pièces et contrôle.		

### 5.1.5 Moulage en carapace : (Corning ou Shell-moulin).

On utilise pour ce procédé, un sable spécial à base de résines thermodurcissables qui, mient au contact d'une plaque modèle chauffée à une température d'environ  $200^{\circ}\text{C}$ , durcit sur une couche de quelques millimètres Carapace.

A chaque carapace correspond un demi-moule, qui sera polymérisé puis collé sous presse (deux à deux)(33).

#### Caractéristiques

- Utilisation de tous alliages ; bon aspect des pièces moulées.
- Cadences de fabrications de 50 à 60 carapaces/heure
- Tolérances :  $\pm 0,2\text{mm}$  ; parfois inférieures selon alliage, joint etc.
- Amortissement outillage moyenne à grande série (33).

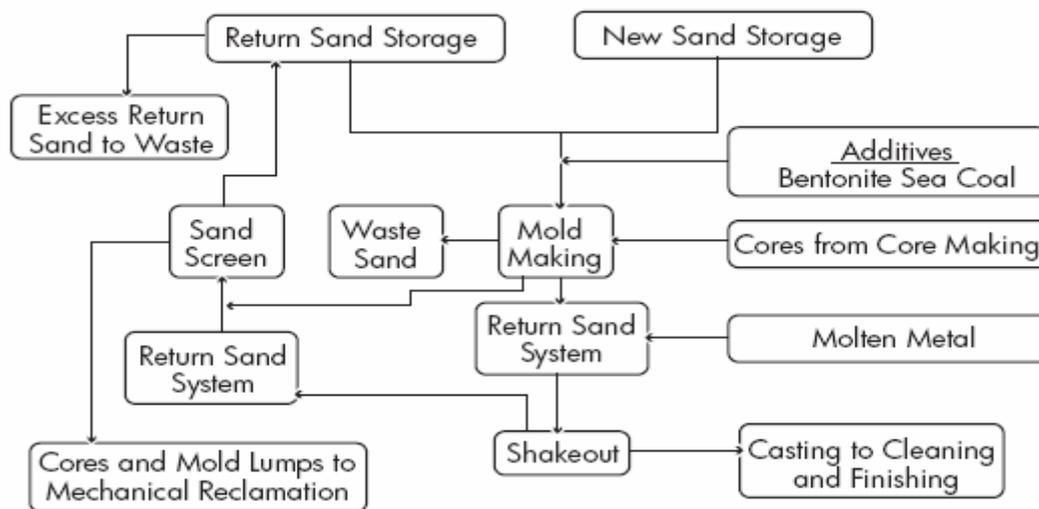
## 6 Options de gestion actuelles

### 6.1 Recyclage

Dans les procédés de fonderie en générale, le sable provenant de moules ou de noyaux aplatis peut être récupéré et réutilisé. Un nouveau sable et un nouveau liant sont généralement ajoutés pour maintenir la qualité de la coulée et compenser le sable perdu pendant les opérations normales. Cinq classes de fonderies différentes produisent du sable de fonderie. Les fonderies ferreuses (fonte grise, fonte ductile et acier) produisent le plus de sable et le reste est produit par l'aluminium, le cuivre, le laiton et le bronze. Les 3 000 fonderies aux États-Unis produisent 6 à 10 millions de tonnes de sable de fonderie par an. Bien que le sable soit généralement utilisé plusieurs fois dans la fonderie avant qu'il ne devienne un sous-produit, seulement 10% du sable de fonderie a été réutilisé ailleurs en 2001. Les sables des fonderies de laiton, de bronze et de cuivre ne sont généralement pas réutilisés. Bien que les chiffres exacts ne soient pas disponibles, la meilleure estimation est d'environ 10

Millions de tonnes de sable de fonderie peuvent être utilisées avantageusement chaque année (33)

La figure.11. Montre comment le sable est réutilisé et devient du sable de fonderie (33).



**Figure 11** : Recyclage du sable de fonderie.

Peu de renseignements sont disponibles sur la quantité de sable de fonderie utilisée à d'autres fins que la récupération en usine, mais le sable de fonderie usé a été utilisé comme substitut d'agrégat fin dans les applications de construction et comme four d'alimentation dans la fabrication du ciment Portland (31).

## **6.2 Mise au rebut**

La plus grande partie du sable de fonderie épuisé provenant des opérations de sables verts est remplie de terre, parfois étant utilisé comme couverture supplémentaire (34).

## **6.3 Sources de marché**

Le sable de fonderie peut être obtenu directement auprès des fonderies. Le sable de fonderie, avant utilisation, est un matériau de calibre uniforme. La matière usée, cependant, contient souvent du métal provenant de la coulée et du matériau de moule et de noyau surdimensionné contenant un liant partiellement dégradé. Le sable de fonderie usé peut également contenir des contaminants lessivables, y compris des métaux lourds et des phénols qui sont absorbés par le sable pendant le processus de moulage et les opérations de moulage. Les phénols sont formés par la décomposition thermique à haute température et le réarrangement des liants organiques pendant le processus de coulée du métal. Les métaux lourds sont plus préoccupants dans les sables de fonderie non ferreux provenant de fonderies non ferreuses. Le sable de fonderie usé des fonderies de laiton ou de bronze, en particulier, peut contenir de fortes concentrations de cadmium, de plomb, de cuivre, de nickel et de zinc (34).

## Chapitre III: Méthodologie et Choix des Matériaux

*Les matériaux utilisés dans cette étude, ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des bétons à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître les différentes caractéristiques des constituants rentrant dans la formulation des mortiers car chacun pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela dans ce chapitre, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du béton. La méthodologie suivie pour réaliser ce travail, sera aussi présentée dans ce chapitre.*

### 1 Objectif du travail

Notre objectif est d'étudier l'effet de la substitution partielle du sable par le sable de fonderie sur les propriétés physico-mécaniques des bétons autoplaçants. Le sable est substitué par le déchet sable de fonderie (0-5 mm) à des teneurs (0, 10, 30, 50% par poids de sable). Objectif de travail économique en remplacement le sable par un déchet technique (avoir un béton autoplaçant de qualité comparable au béton témoins) et enfin environnemental (recyclage d'un déchet sable de fonderie).

### 2 Caractéristique des matériaux utilisés

#### 2.1 Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II /B-L42.5 (MATINE DE LAFARGE), d'une couleur grise. Il destiné à la construction des ouvrages d'Art d'infrastructures et superstructures pour bâtiments conformément à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Ses propriétés chimiques, minéralogiques et physiques et sont résumées dans les tableaux (1, 2 et 3).

##### 2.1.1 Avantages produit

- Une résistance initiale élevée pour ouvrages nécessitants un décoffrage rapide.

- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie.
- Une classe vraie qui offre une haute performance au béton.

### 2.1.2 Applications recommandées

- Construction des ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments.
- Préfabrication légère.
- Béton de haute performance.

### 2.1.3 Caractéristiques chimiques

**Tableau 6 :** Composition chimique du ciment par fluorescence X.

SiO <sub>2</sub>	CaO	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Cl-	CaO libre	Ins	P.F
16.88	59.76	4.34	2.83	2.38	0.01	0.54	1.69	0.025	1.369	2.67	11.26

### 2.1.4 Caractéristiques minéralogiques

**Tableau 7:** Composition minéralogique du ciment par diffraction des rayons X.

Eléments	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaOL	gypse	Calcaire (L)
%	53	22	04	14	< 03	05	22

### 2.1.5 Caractéristiques physiques du ciment

**Tableau 8:** Caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	28.9	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	165	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	245	(min)	NF EN 196-3
SSB	4582	(Cm <sup>2</sup> /g)	NF EN 196-6
Masse volumique absolue	3.00	(g/cm <sup>3</sup> )	NF EN 196-5

### 2.1.6 Caractéristiques mécaniques du ciment

**Tableau 9 :** Caractéristiques mécaniques du ciment.

Essais	Âge [J]		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	22.8	37.6	47.7
Résistance à la flexion (MPa)	4.6	6.1	7.0

## 2.2 Les fines

Dans notre travail, le sable utilisé dans la confection des bétons autoplaçants contient une grande quantité de fines, de l'ordre de 14% apportant une quantité suffisante de fines pour réaliser un béton autoplaçant. Il est donc nécessaire d'ajouter des fillers calcaires.

## 2.3 Les granulats

Les granulats utilisés dans notre recherche sont des granulats concassés de nature calcaire, proviennent de l'Entreprise Nationale de marbre (ENAMARBRE) de Mekla (Tizi-Ouzou) dans le but de valoriser les granulats concassés dans la fabrication des bétons autoplaçant et de protéger les alluvions.

### 2.3.1 Le sable

Le sable utilisé, provient de la carrière de Tizi Bouamen l'Entreprise Nationale de Marbe (ENAMarbe) / Tizi-Ouzou.



**Figure 12** : Sable utilisé dans notre recherche.

- ❖ **Caractéristiques du sable** : les propriétés physiques de sable (0/3) sont présentées dans le tableau 10

**Tableau 10:** Caractéristiques physiques du sable concassé (0/3) selon la norme NF EN 933-1.

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique réelle	3.1	(g /cm <sup>3</sup> )
Masse volumique imbibé	2.52	(g /cm <sup>3</sup> )
Masse spécifique	2.7	(g /cm <sup>3</sup> )
EVS	52.01	(%)
La teneur en bleu	1.2	(%)

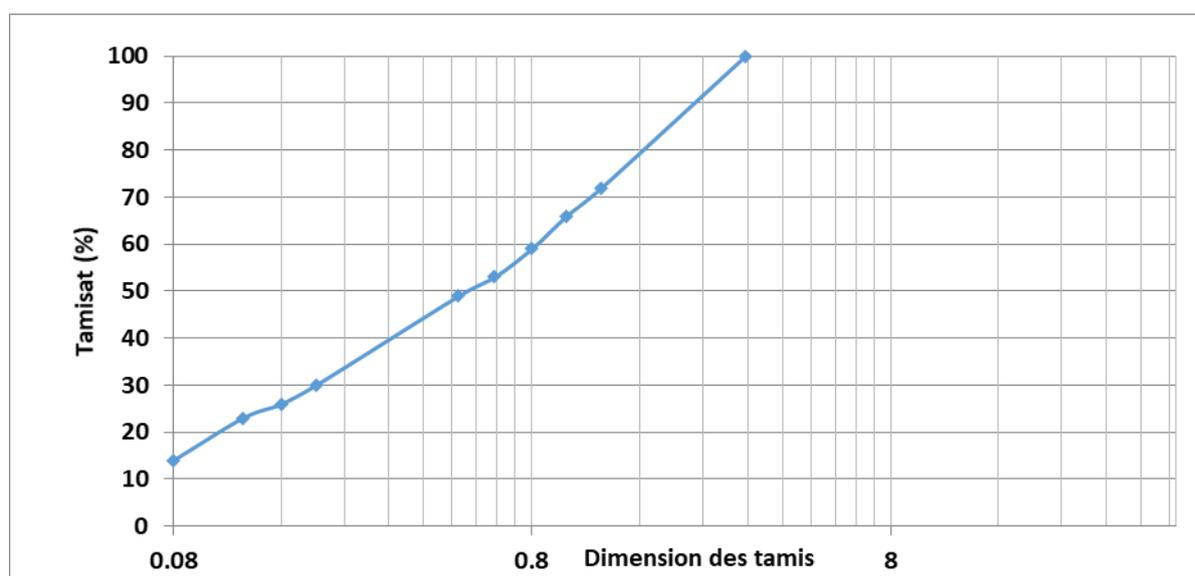
### ❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

**Tableau 11:** Analyse granulométrique par tamisage du sable 0/3 selon NF EN 933-1.

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
3.15	0	0	100
1.25	140	28	72
1	170	34	66
0.8	205	41	59
0.63	235	47	53
0.5	255	51	49
0.2	350	70	30
0.16	370	74	26
0.125	385	77	23
0.08	430	86	14
Fond de tamis	495	99	1

**Module de finesse du sable  $M_f = 2$**

On remarque que le sable 0/3 a un module de finesse ( $M_f = 2$ ) faible donc le sable est riche en éléments fins.



**Figure 13 :** Analyse granulométrique de sable 0/3 selon la norme NF EN 9331.

### 2.3.2 Gravier

#### ❖ Caractéristiques physiques

D'après les essais physiques du gravier nous avons confirmé que la masse volumique apparente et la masse volumique absolue est la même pour le gravier 3/8 et la 8/16 par ce que se sont de la même nature.

**Tableau 12** : Caractéristiques physiques du gravier

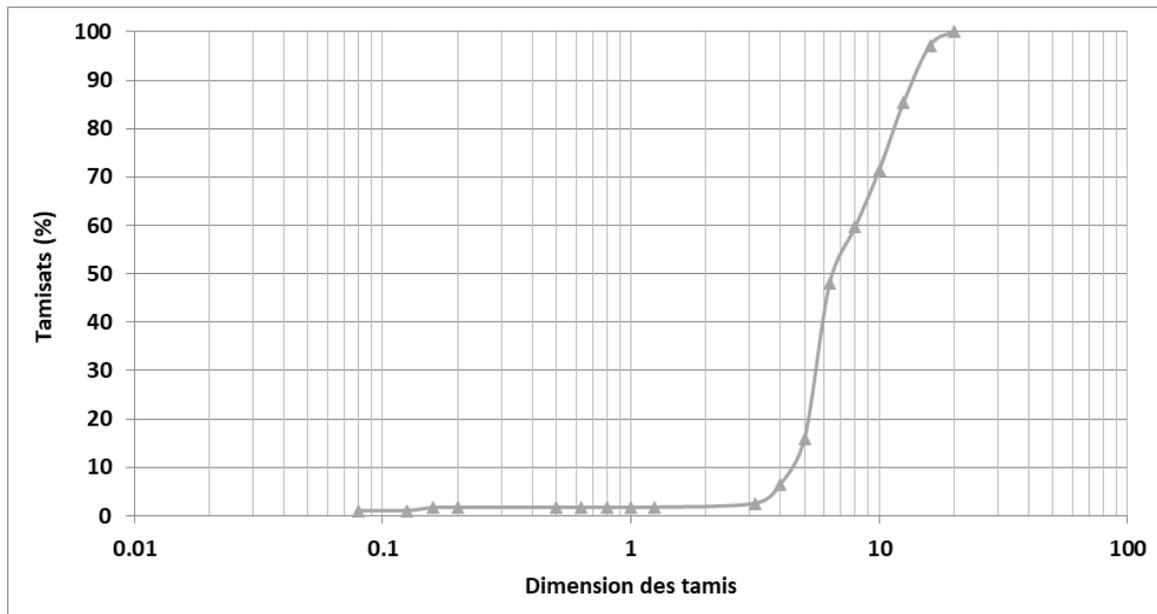
Gravier	3/8	8/16	Unité
Masse volumique apparente	1412	1398.45	(Kg/m <sup>3</sup> )
Masse volumique absolus	2.61	2.61	(%)

❖ **Analyse granulométrique et classe granulaire****Tableau 13** : Analyse granulométrique par tamisage du gravier **8/16** selon NF EN 933-1.

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
20	0	0	100
16	85	2.83	97.17
12.5	440	14.67	85.33
10	855	28.5	71.5
8	1390	46.33	53.67
6.3	1410	47	53
5	2520	84	16
4	2805	93.5	6.5

Analyse granulométrique par tamisage du gravier **8/16** selon NF EN 933-1 (suite **Tableau 14**).

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
3.15	0	0	100
1.25	140	28	72
1	170	34	66
0.8	205	41	59
0.63	235	47	53
0.5	255	51	49
0.2	350	70	30
0.16	370	74	26
0.125	385	77	23
0.08	430	86	14
Fond de tamis	495	99	1
<b>Module de finesse du sable <math>M_f = 2</math></b>			



**Figure 14** : Analyse granulométrique par tamisage de gravier 8/16

## 2.4 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant de SIKA® de type VISCOCRETE® TEMPO 12 Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi. Conforme à la norme NF EN 934-2. Cet adjuvant est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

### 2.4.1 Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, SIK-A VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

### 2.4.2 Caractères généraux

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h),
- Robustesse à la ségrégation,

- Qualité de parement.

#### 2.4.3 Conditionnement

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

#### 2.4.4 Stockage

Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

#### 2.4.5 Caractéristiques

- Données techniques densité  $1,06 \pm 0,01$
- pH 4,5 à 6,5
- Teneur en  $\text{Na}_2\text{O Eq.} \leq 1 \%$
- Extrait sec 28,0 à 31,0 %
- Teneur en ions  $\text{Cl}^- \leq 0,1 \%$

#### 2.4.6 Conditions d'application

Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

#### 2.4.7 Propriétés et effets

Grace à ces propriétés le SIKA ® VISCOCRETE ® TEMPO 12 permet d'avoir les effets suivants :

##### 2.4.7.1 Sur béton frais

- Obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- Une très bonne maniabilité
- Un long maintien de l'ouvrabilité
- De facilité la mise en œuvre du béton

#### 2.4.7.2 Sur béton durci

- Bonne résistances initiale et finales
- De diminuer la porosité
- Bel aspect de parement au décoffrage
- De diminuer le retrait

#### 2.4.8 Délai de conservation

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

#### 2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable du réseau publique de la ville de TIZI OUZOU

#### 2.6 Déchet du sable de fonderie

Le déchet de sable de fonderie utilisé dans notre travail, est un déchet de recyclage. Ce déchet a été caractérisé afin de connaître leurs caractéristiques à savoir la masse volumique.



**Figure 15 :** Déchet de sable fonderie utilisé dans cette étude.

Dans notre travail, nous avons utilisé ce sable de fonderie autant que substitution partielle au sable. Donc, les caractéristiques de ce sable ont été déterminées à l'état naturel.

## 2.6.1 Caractéristiques des sables de fonderie

Tableau 15: Caractéristiques physiques du déchet des sables de fonderie.

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1.33	(g /cm <sup>3</sup> )
Masse volumique absolue	2.5	(g /cm <sup>3</sup> )
Absorption	1.8	(%)

Tableau 16 : Analyse granulométrique du déchet (la norme NF P 18-560).

Ouverture des tamis	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
0.8	0	0	100
0.5	5	1	99
0.315	70	14	86
0.2	370	74	26
0.16	450	90	10
0.125	475	95	5
0.08	485	97	3
Fon de tamis	795	99	1

**Module de finesse =Mf = 2.08**

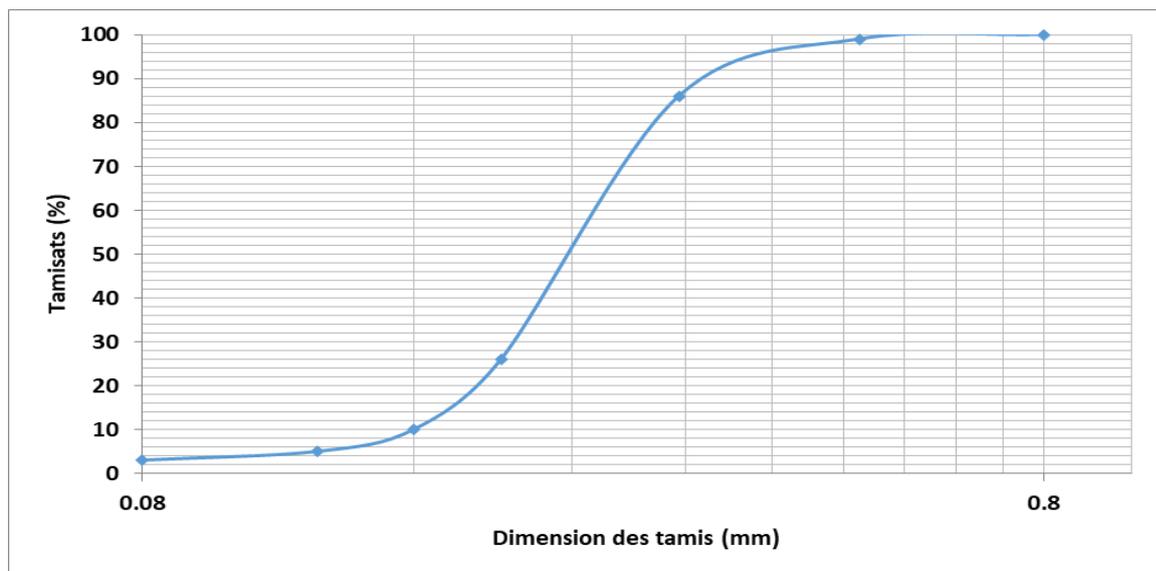


Figure 16 : Analyse granulométrique sable de fonderie.

## Chapitre IV : Formulation des bétons autoplaçants

*Des bétons autoplaçants à base de sable de fonderie comme substitution partielle au sable avec différent pourcentage (10%, 30% et 50%). Et pour ce là, nous avons opté la méthode japonaise pour l'ensemble des bétons que nous avons formulés. Ce présent chapitre consiste à présenter une étude de la formulation*

### 1 Introduction

Dans la littérature, on trouve un grand nombre d'approches et méthodes de formulation pour les bétons autoplaçants nous avons retenu pour notre formulation une méthode purement expérimentale dite « Japonaise » proposé par Okamura et al.

### 2 Composition du béton autoplaçant

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation de nos bétons autoplaçants est donc basée sur la méthode japonaise.

Les proportions des constituants sont calculées selon les règles de la méthode japonaise :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport  $G/S = 1$ .
- Le volume de sable est limité à 40% volume de mortier.
- Le rapport volumique de l'eau/poudre est supposé entre 0.9 et 1. Dans notre cas, nous avons pris un rapport massique  $E / (\text{ciment} + \text{fine})$  égale à 0,35.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. La formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

### 3 Calcul des proportions

Volume total ( $V_T$ ) du béton est de  $1\text{m}^3$  qui est égale à 1000 l.

$$V_T = V_{\text{mortier}} + V_{\text{sable}}$$

On sait que le  $V_{\text{sable}}$  est égal à 40%  $V_{\text{mortier}}$ , donc :

$$V_T = V_{\text{mortier}} + 0.4 V_{\text{mortier}} = 1.4 V_{\text{mortier}} \rightarrow V_{\text{mortier}} = 1000/1.4 = 714.3 \text{ l}$$

$$V_{\text{mortier}} = \mathbf{714.3 \text{ l}}$$

$$\text{Donc : } V_{\text{sable}} = 40\% V_{\text{mortier}} = 0.4 \times 714.3 = 285.7 \text{ l}$$

$$V_{\text{sable}} = \mathbf{285.7 \text{ l}}$$

$$\text{Et comme } G/S = 1 \rightarrow V_{\text{gravier}} = V_{\text{sable}} = \mathbf{285.7 \text{ l}}$$

Selon l'analyse granulométrique de sable, la teneur en fine ( $< 0.08 \text{ mm}$ ) est de l'ordre de 14 %.

Le volume total de sable à prendre en considération dans nos calculs est  $V_{(\text{sable+fine})} = \mathbf{324.5 \text{ l}}$ .

$$\text{Donc : } V_{\text{fine}} = 14\% \times 324.5 = \mathbf{45.43 \text{ l}}$$

$$V_{\text{mortier}} = V_{\text{pâte}} + V_{\text{sable}} \rightarrow V_{\text{pâte}} = 714.3 - 324.5 = 388.8 \text{ l}$$

$$V_{\text{pâte}} = \mathbf{388.8 \text{ l}}$$

$$V_{\text{pâte}} = V_{\text{ciment}} + V_{\text{fines}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{superplastifiant}}$$

$$\text{Avec } \rho_{\text{ciment}} = 3 \text{ kg/cm}^3, \rho_{\text{sable}} = 2.6 \text{ kg/cm}^3, \rho_{\text{SP}} = 1.01 \text{ kg/cm}^3$$

$$V_{\text{ciment}} = \mathbf{166,7 \text{ l}}$$

### 4 Optimisation de la composition de BAP

Le volume de la pâte pour  $1\text{m}^3$  du BAP égale à  $401.8 \text{ l/m}^3$ .

- $500 \text{ kg/m}^3$  du ciment.
- $45.43 \text{ kg/m}^3$  du (calcaire) comme addition (14 % de poids du sable).
- $E/(C+F) = 0,35$
- $G/S=1$

#### 4.1 Formulation de béton autoplaçant (BAP)

On a:

$$C = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$F = 45.43 \text{ l}$$

$$F = 45.43 \times 2.6 = 118.1 \text{ kg/m}^3$$

$$E/(C+F) = 0.35$$

Donc

$$E = 0.35 \cdot (500 + 118.1)$$

$$E = 216.3 \text{ kg/m}^3$$

Le dosage en superplastifiant est 1,5% de la masse de ciment

$$SP = 0,15 \cdot 500$$

$$SP = 7.5 \text{ l/m}^3$$

On a utilisé un seul type de gravier (8/15) car il contient plus de 30% de la fraction 3/8.

$$G/S = 1$$

$$S = 324.5 \text{ l}$$

$$G = 285.7 \text{ l}$$

$$S = 324.5 \cdot 2.6 = 843.7 \text{ kg/m}^3$$

$$G = 285.7 \cdot 2.6 = 742.8 \text{ kg/m}^3$$

**Tableau 17:** Composition du BAP (Béton témoin).

Constituants	Quantité	Unité
Sable	843.7	kg /m <sup>3</sup>
Gravier 8/16	742.8	kg /m <sup>3</sup>
Ciment	500.0	kg /m <sup>3</sup>
Eau	216.3	kg /m <sup>3</sup>
Superplastifiant	7.5	kg /m <sup>3</sup>
Fins	118.1	kg /m <sup>3</sup>

#### 4.2 Formulation de béton auto plaçant (BSF10) avec 10% de sable de fonderie

Le dosage en SF et 10% S

- SF= 10% 843.8
- SF= 84.38 kg/m<sup>3</sup>
- S=759.4 kg/m<sup>3</sup>
- G=742.8 kg/m<sup>3</sup>
- E=216.3 kg /m<sup>3</sup>
- F=118.1 kg /m<sup>3</sup>

Le dosage en superplastifiant est 1.9% de la masse de ciment

$$SP=0,19*500$$

$$SP=9.5 \text{ kg/m}^3.$$

**Tableau 18** : Composition du BSF10 à 10% de sable de fonderie.

Constituants	Quantité	Unité
Sable	759.4	kg /m <sup>3</sup>
Sable fonderie	84.38	kg /m <sup>3</sup>
Gravier 8/16	742.8	kg /m <sup>3</sup>
Ciment	500.0	kg /m <sup>3</sup>
Eau	216.3	kg /m <sup>3</sup>
Superplastifiant	9.5	kg /m <sup>3</sup>
Fins	118.1	kg /m <sup>3</sup>

### 4.3 Formulation de béton auto plaçant (BSF30) avec 30% de sable de fonderie

Le dosage en SF et 30% SF

$$SF = 253.1 \text{ kg/m}^3$$

$$S=590.7\text{kg/m}^3$$

$$G=742.8 \text{ kg/m}^3$$

$$E=216.3 \text{ kg /m}^3$$

$$F=118.1 \text{ kg /m}^3$$

Le dosage en superplastifiant est 2.5% de la masse de ciment

$$SP=0,25*500$$

$$SP=14 \text{ kg/m}^3.$$

**Tableau 19** : Composition du BSF30 à 30% de sable de fonderie.

Constituants	Quantité	Unité
Sable	590.7	kg /m <sup>3</sup>
Sable fonderie	253.1	kg /m <sup>3</sup>
Gravier 8/16	742.8	kg /m <sup>3</sup>
Ciment	500.0	kg /m <sup>3</sup>
Eau	216.3	kg /m <sup>3</sup>
Superplastifiant	14	kg /m <sup>3</sup>
Fins	118.1	kg /m <sup>3</sup>

### 4.4 Formulation de béton auto plaçant (BSF50) avec 50% de sable de fonderie

Le dosage en SF et 50% SF

$$SF = 421.9 \text{ kg/m}^3$$

$$S=421.9 \text{ kg/m}^3$$

$$G=742.8 \text{ kg/m}^3$$

$$E=216.3 \text{ kg /m}^3$$

$$F=118.1 \text{ kg /m}^3$$

Le dosage en superplastifiant est 3% de la masse de ciment

$$SP=0.03*500$$

$$SP=15 \text{ kg/m}^3.$$

**Tableau 20** : Composition du BSF50 à 50% de sable de fonderie.

Constituants	Quantité	Unité
Sable	421.9	kg /m <sup>3</sup>
Sable fonderie	421.9	kg /m <sup>3</sup>
Gravier 8/16	742.8	kg /m <sup>3</sup>
Ciment	500.0	kg /m <sup>3</sup>
Eau	216.3	kg /m <sup>3</sup>
Superplastifiant	15	kg /m <sup>3</sup>
Fins	118.1	kg /m <sup>3</sup>

**Tableau 21** : Les quantités des constituants en kg pour 1m<sup>3</sup> du béton

Bétons	Gravier	Sable	Ciment	Eau	SP	Fins	SF
BAP0	742.8	843.8	500.0	216.3	7.5	118.1	/
BAP10	742.8	759.4	500.0	216.3	9.5	118.1	84.38
BAP30	742.8	590.7	500.0	216.3	14	118.1	253.1
BAP50	742.8	421.9	500.0	216.3	15	118.1	421.9

## 5 Préparation de la gâchée

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie. Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé. Dans notre cas elle est de 1/20 ème du m<sup>3</sup>. Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

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

l'étuve.

- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, fumé de silice) et les introduire dans le malaxeur.
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement en premier un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- Ajouter les trois quarts d'eau graduellement.
- Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration pour le béton autoplaçant.



**Figure 17** : Malaxeur utilisé pour le béton autoplaçant      **Figure 18** : Moules de béton autoplaçant  
(Université Mouloud Mammeri TIZI OUZOU)

## 6 Conservation des éprouvettes

Après le gâchage, pour un béton ordinaire ou pour un BAP, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h. Une fois démoulées, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C (figure 19), ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.



Figure 19 : Conservation des éprouvettes (Université Mouloud Mammeri TIZI OUZOU)

## Chapitre V : Résultats et Interprétations

*Les différents résultats des essais physico-mécaniques des bétons autoplaçants à base du sable de fonderie, seront présentés dans ce chapitre. Une interprétation de ces résultats a été également présentée dans le même chapitre. Les essais physico-mécaniques effectués sur des bétons autoplaçants étudiés, ont été réalisés selon les normes en vigueur.*

Pour connaître l'influence de l'incorporation du sable de fonderie dans les bétons autoplaçants, notre étude a été menée sur l'utilisation du sable de fonderie en tant que sable (par substitution partielle du sable naturel) à différents rapports.

### 7 Caractérisations des bétons autoplaçants à l'état frais

Tous les mélanges des bétons étudiés ont été élaborés avec essai d'étalement, essai de boîte en L et essai de stabilité de tamis.

#### 7.1 Fluidité (Essai d'étalement)

C'est un essai utilisé pour estimer la fluidité des BAP sans confinement. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams. Il consiste à mesurer le diamètre moyen d'une galette de béton (Figure 1) après soulèvement du cône.

Les valeurs de l'étalement sont typiquement dans une fourchette de 60 à 80cm.

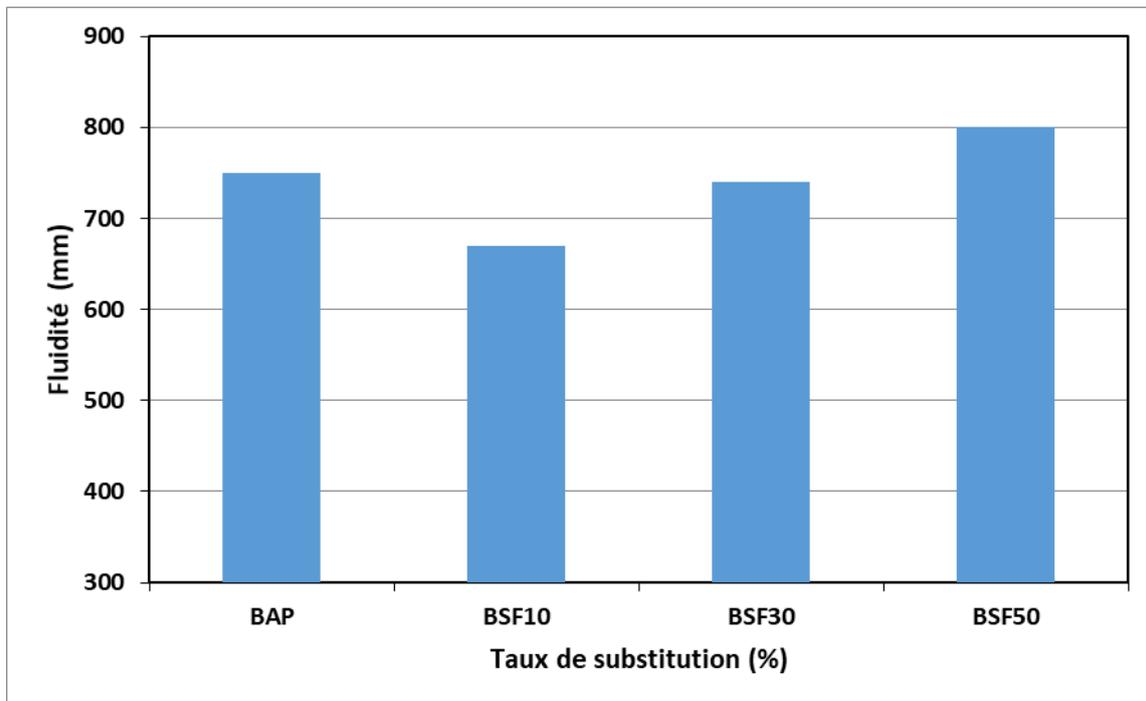


**Figure 20** : Essais d'étalement sur le béton autoplaçant frais (Université Mouloud Mammeri TIZI OUZOU).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 22.

**Tableau 22:** L'essai de l'étalement.

Bétons	Etalement Diamètre (mm)	Mise en œuvre
BAP	750	Bonne
BSF10	670	Bonne
BSF30	740	Bonne
BSF50	800	Bonne



**Figure 21 :** Fluidité des bétons étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie.

La fluidité des bétons étudiés a été estimée par l'essai de l'étalement au cône d'Abrams. Les résultats sont représentés dans la figure 21. D'après les résultats, nous remarquons qu'une légère diminution de la fluidité du béton à 10% de substitution du sable (0/3) par le sable de fonderie. Ensuite, au-delà de 10% de substitution le béton devient plus fluide. A 30% de remplacement de sable (0/3) par le sable de fonderie, la fluidité du béton a été améliorée. L'amélioration de la fluidité des bétons est peut-être due à la finesse du sable (0/3) et celle de sable de fonderie. Ce dernier est moins fin que le sable (0/3) et celui-ci un module de finesse plus faible que celui de sable de fonderie.

## 7.2 Capacité de remplissage (Essai de boîte en L)

L'essai de la boîte en L (Figure 22) est effectué pour le béton autoplaçant seulement. Il permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton, après soulèvement de la trappe en acier, on mesure le taux de remplissage qui est défini comme étant le rapport des hauteurs de béton dans les parties verticales H2/H1.

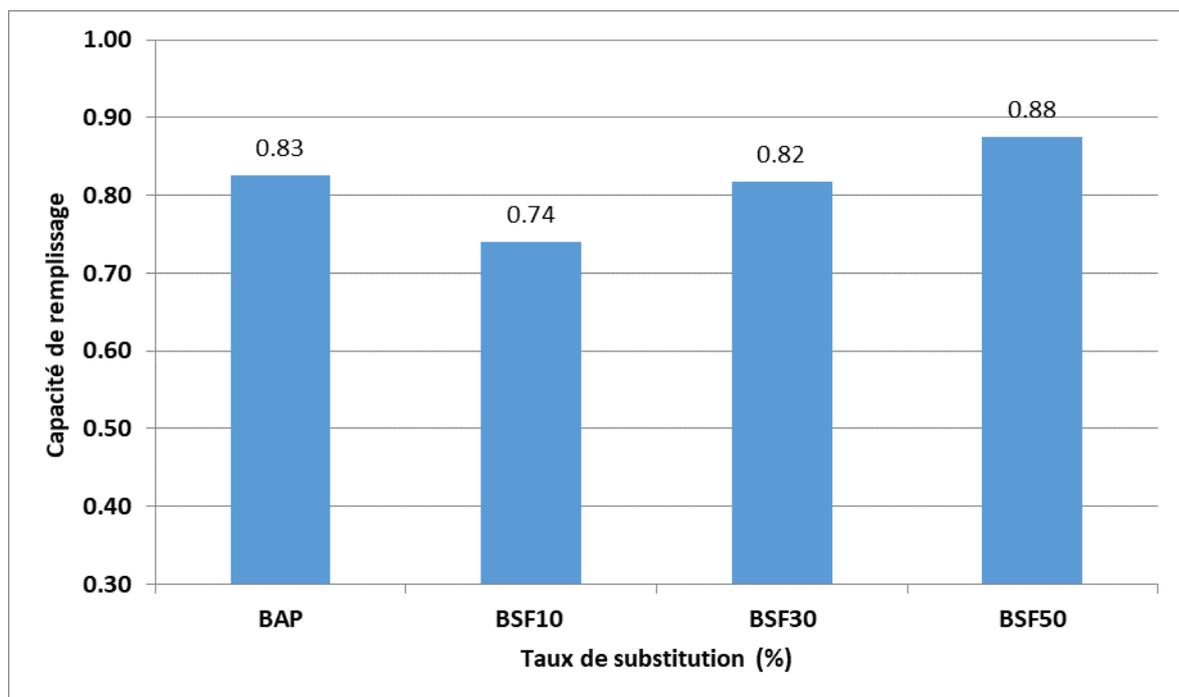


**Figure 22** : Essais de boîte en L sur le béton autoplaçant frais.

Les résultats des essais effectués sur les différents BAP sont présentés dans le tableau 23.

**Tableau 23** : Essai de boîte en L.

Bétons	Boîte en L
<b>BAP</b>	0.83
<b>BSF10</b>	0.74
<b>BSF30</b>	0.82
<b>BSF50</b>	0.88



**Figure 23** : Capacité de remplissage des bétons étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie.

La mise en œuvre des bétons étudiés a été mesurée par l'essai à la boîte en L pour la caractériser la coulabilité d'un béton autoplaçant. Les résultats de cet essai sont donnés dans la figure 23. Selon la figure, nous pouvons constater que plus le taux de substitution de sable (0/3) par sable de fonderie augmente plus la mise en œuvre des bétons s'améliore plus les bétons deviennent facile à mettre en place. Cette amélioration de la mise en place est aussi expliquée par la finesse des sables. En effet, le sable de fonderie est moins fin que le sable (0/3) ce qui favorise la coulabilité des bétons.

### 7.3 Stabilité des bétons (Essai de stabilité de tamis)

L'essai de la stabilité au tamis permet de qualifier les bétons autoplaçants vis à vis du risque de ségrégation.

On mesure le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon passant à travers d'un tamis d'ouverture 5 mm.

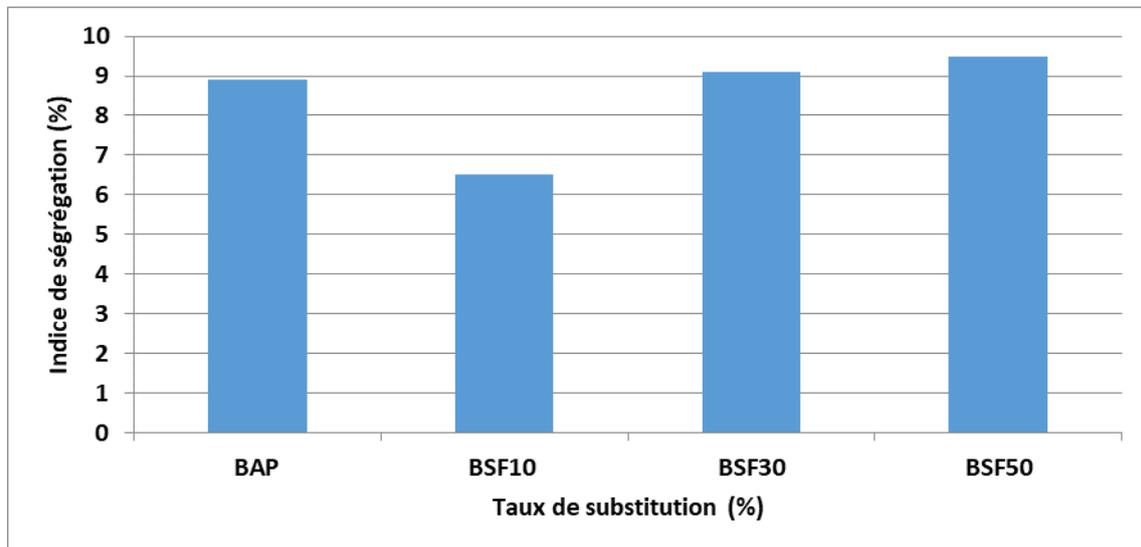


**Figure 24 :** Essai de stabilité de tamis sur le béton autoplaçant frais.

Le tableau 24 présente les résultats de la résistance à la ségrégation obtenue par l'essai de stabilité au tamis qui a été effectué sur tous les BAP.

**Tableau 24 :** Essais de stabilité de tamis.

Bétons	Indice de ségrégation	Mise en œuvre
<b>BAP</b>	8.9	Critique
<b>BSF10</b>	6.5	Critique
<b>BSF30</b>	9.1	Critique
<b>BSF50</b>	9.5	Satisfaisante



**Figure 25 :** Indice des ségrégations des bétons étudiés en fonction du taux de substitution du sable par déchet sable de fonderie.

La stabilité et l'homogénéité des bétons autoplacants a été estimée par l'essai de stabilité au tamis en mesurant les passants au tamis du béton frais rapporté à la masse totale de l'échantillon du béton. Les résultats de la figure 25, montre clairement que plus le taux de substitution du sable (0/3) par le sable de fonderie, augmente plus les passants au tamis augmentent. Jusqu'à 30% de substitution, on a enregistré une laitance du béton plus au moins acceptable.

## 8 Caractérisations des bétons autoplacants à l'état durci

### 8.1 Résistance à la compression des bétons

L'essai de compression consiste à soumettre l'éprouvette de béton à l'écrasement par compression axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à rupture de l'éprouvette (Figure 26).



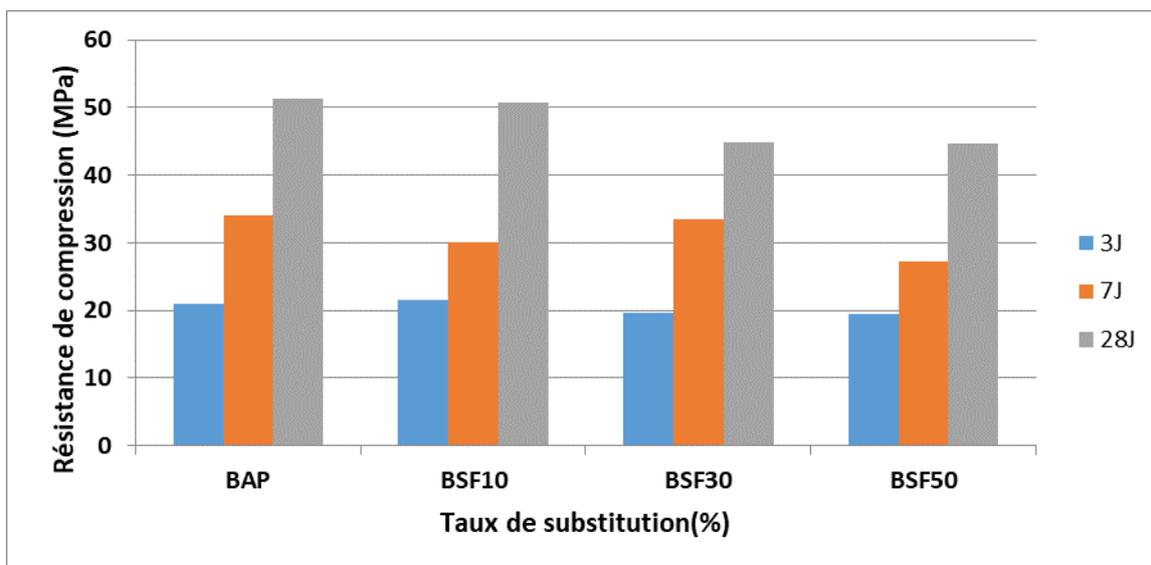
**Figure 26 :** Essai de compression.

L'objectif de cet essai est de suivre l'évolution de la résistance à la compression et le comportement des différents BAP.

Les essais effectués sur les différents bétons à différents âges (3, 7, 28 jours) ont donné les résultats présentés dans le tableau 25.

**Tableau 25 :** Essais d'écrasement par compression des bétons étudiés effectués à 3, 7, et 28 jours

Eprouvette	Résistance à compression en MPa		
	3J	7J	28J
<b>BAP</b>	21.01	34.04	51.31
<b>BSF10</b>	21.5	30	50.76
<b>BSF30</b>	19.61	33.4	44.8
<b>BSF50</b>	19.4	27.3	44.6



**Figure 27 :** Evolution de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (3, 7, et 28 jours).

L'évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés a été représentée sous forme d'histogramme de la figure 8. Selon les résultats obtenus, il est remarquable que pour tous les bétons, la résistance à la compression des bétons augmente en fonction d'âge de durcissement (3, 7 et 28j). Cela est expliqué par l'hydratation des minéraux du clinker contenu dans le ciment qui produit les C-S-H améliorant la résistance du béton. Cependant, une légère diminution de 10% de la résistance a été observée pour les bétons avec 30% et 50% de substitution de sable 0/3 par le sable de fonderie. La résistance du béton à 10% de sable de fonderie est la même que celle au béton témoins. Cela est traduit par la présence du sable de fonderie qui a favorisé la mise en œuvre du béton ce qui augmente la compacité du béton.

## 8.2 Résistance à la traction par flexion

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes de sections carrées (7x7x28) cm. Le prisme est placé dans une machine automatique de flexion (Figure 28) et est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture.

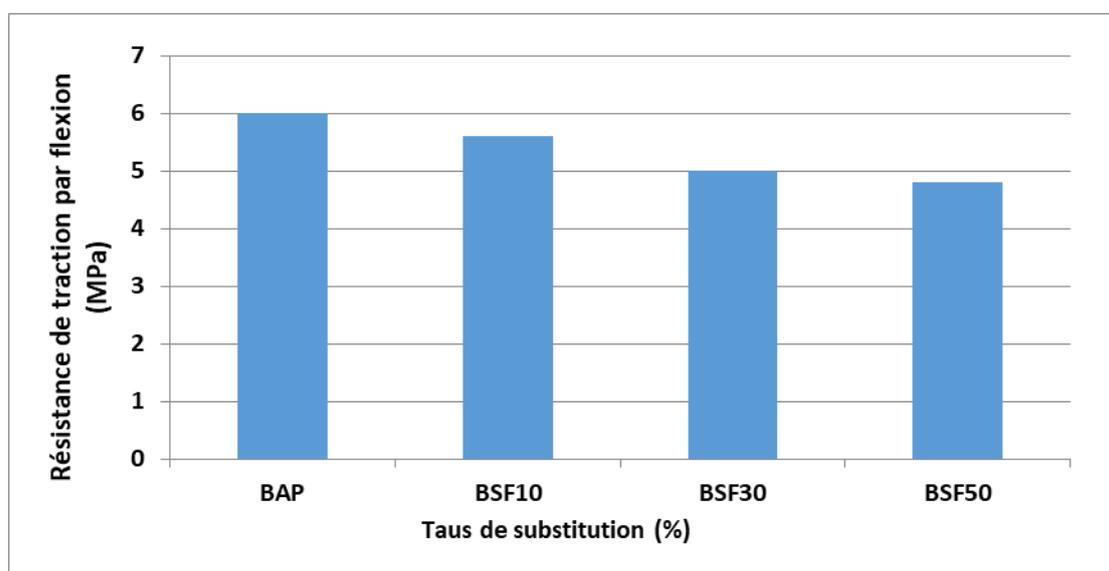


**Figure 28 :** Essai de traction par flexion (Université Mouloud Mammeri TIZI OUZOU).

Les essais effectués sur les différents bétons à 28 jours ont donné les résultats présentés dans le tableau 26.

**Tableau 26 :** Essais de traction par flexion des bétons étudiés effectués à 28 jours

Eprouvette	R28 (MPa)
BAP	6
BSF10	5.6
BSF30	5.01
BSF50	4.8



**Figure 29 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à 28 jours

L'évolution de la résistance à la flexion mesurée à 28 jours pour tous les bétons étudiés, a été représentée dans la figure 29. Selon les résultats obtenus, il est clair que plus le taux de

substitution de sable 0/3 par le SF augmente plus la résistance des bétons diminue mais cette diminution n'est pas significative. Cependant, une légère diminution de 10% de la résistance à la flexion a été enregistrée jusqu'à 30% de sable fonderie.

### 8.3 Ultrason (Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique)

Cet essai est une méthode de détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales dans le béton durci. Elle consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à essayer.

$$E_d = \rho v^2$$

$V$  = La vitesse de d'ultrason en km/s.

$\rho$  = la masse volumique en kg/m<sup>3</sup>.

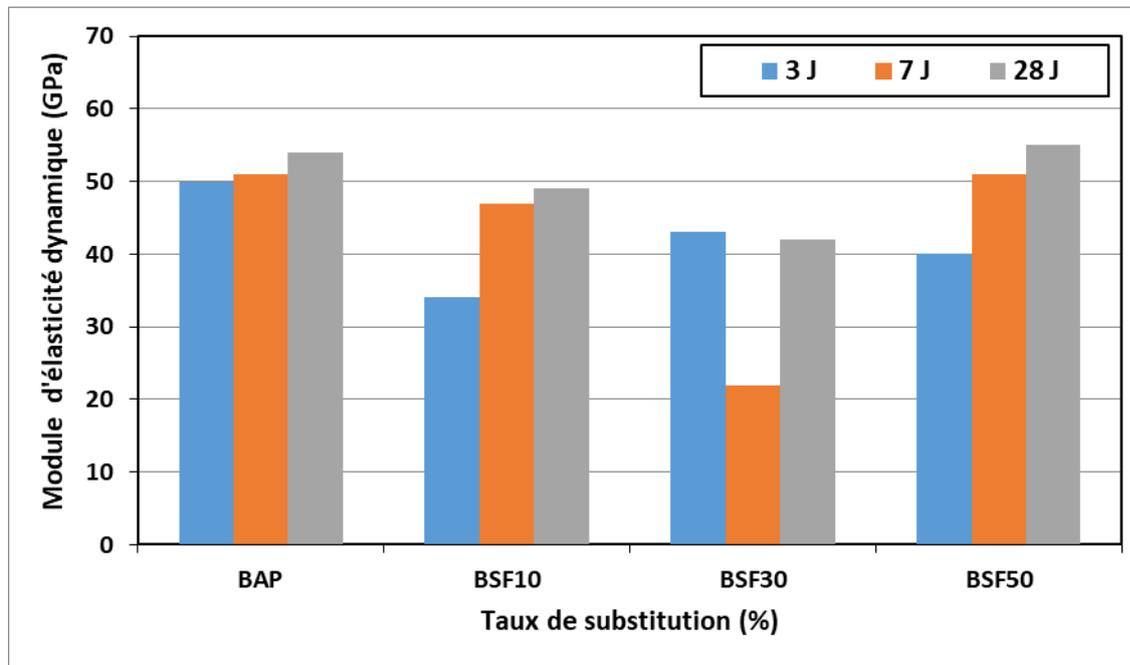


Figure 30 : Appareil d'ultrason.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 27.

Tableau 27 : Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons étudiés effectués à 3, 7, et 28 jours.

Eprouvette	Module d'élasticité dynamique (GPa)		
	3J	7J	28J
<b>BAP0</b>	50	51	54
<b>BSF10</b>	34	47	49
<b>BSF30</b>	43	22	42
<b>BSF50</b>	40	51	55



**Figure 31 :** Evolution de coefficient d'élasticité dynamique des bétons en fonction du taux de substitution de sable par déchet sable de fonderie à différent âge (3, 7, et 28 jours).

Afin de vérifier l'effet de sable de fonderie sur la compacité des bétons étudiés, des essais ultrasoniques ont été effectués sur les éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm<sup>3</sup> pour mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton après 28 jours de durcissement. Après avoir mesuré la vitesse, nous avons calculés les valeurs du module d'élasticité dynamique de chaque béton. Les résultats de cet essai sont représentés dans la figure 31. Il est remarquable que tous les bétons ont un module d'élasticité dépassant les 40GPa et qui peuvent être classé comme des bétons de qualité selon les normes en vigueur. Cela prouve que le sable de fonderie peut être utilisé comme sable (0/5) sans avoir affecté la compacité et la résistance du béton toute en économisant jusqu'à 50% du sable naturel. En effet, jusqu'à 50% de substitution de sable naturel par le sable de fonderie peut donner un béton autoplaçant de compacité acceptable.

## *Conclusion générale*

Rappelons que l'objectif de cette étude, était de voir l'effet de l'utilisation du sable de fonderie (SNVI-Rouiba) en tant que sable (par substitution partielle du sable naturel 0-5mm) sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton autoplaçant. Un travail expérimental a été mené pour évaluer les caractéristiques à l'état frais et durci des bétons autoplaçants en présence du sable de fonderie à des rapports de substitution (sable de fonderie à 0, 10, 30 et 50% par poids du sable). Il en résulte que;

- Une légère diminution de la fluidité du béton à 10% de substitution du sable (0/3) par le sable de fonderie a été observée. Jusqu'à 30% de remplacement de sable (0/3) par le sable de fonderie, la fluidité du béton a été améliorée. L'amélioration de la fluidité des bétons est peut-être due à la finesse du sable (0/3) et celle de sable de fonderie ;
- Le taux de substitution de sable (0/3) par sable de fonderie a nettement amélioré la mise en œuvre des bétons et que le béton devient facile à mettre en place sans avoir la ségrégation des constituants.
- Les résultats des essais mécaniques ont montré une légère diminution de 10% de la résistance pour les bétons avec 30% et 50% de substitution de sable 0/3 par le sable de fonderie. La résistance du béton à 10% de sable de fonderie est la même que celle au béton témoins. Cependant, plus le taux de substitution de sable 0/3 par le SF augmente plus la résistance à la flexion des bétons diminue légèrement mais cette diminution n'est pas significative. En effet, une réduction de 10% de la résistance à la flexion a été enregistrée jusqu'à 30% de sable fonderie ;
- Après avoir calculé le module d'élasticité dynamique (déterminer par la méthode ultrasonique), il a été constaté que tous les bétons ont un module d'élasticité dépassant les 40GPa et qui peuvent être classé comme des bétons de qualité selon les normes en vigueur. Cela prouve que le sable de fonderie peut être utilisé comme sable (0/5) sans avoir affecté la compacité et la résistance du béton toute en économisant jusqu'à 50% du sable naturel.

## Bibliographie

- [1] BATIMAG, revue spécial huitième salon BATIMATEC, Mai 2005.
- [2] A.CHIKH, «Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant,» l'école nationale polytechnique, 2006.
- [3] K. KHAYATt, «testing and performance of self-consolidating concrete,» *ACI Mareriels Journal*, pp. 346-353, 1999.
- [4] «NF P 15-010,» 1997.
- [5] FEBELCEM, «les bétons autoplaçants,» Fédération de l'Industrie Cimentreie Belge, Bruxelles, 2006.
- [6] D. G. e. F. J, «Nouveau guide du béton et de ses constituants,» 8ème édition,, Eyrolles, 1998.
- [7] B90G, Centre D'information Sur le Ciment et Ces Application, 7.place de la Défense.92974 Paris. la la Défense CEDEX, L'école Française Du Béton , november 2006.
- [8] p. d. c. couillard, «les superplastifiants,» [htt://ww.béton couillard.com](http://ww.béton couillard.com).Internet, 2008.
- [9] AFGC, «Recommandation pour l'emploi des béton autoplaçants,» Association française de génie civil, 2008.
- [10] S. Jie, «comportement mécanique des matériaux et des structures percontraintes en béton autoplaçants (BAP).,» Thèse de doctorat de l'université de Reims champagne-ardenne-france, 2009.
- [11] K. K.H, «Workability,Testing,and Performance of Self-Consolidationg Concret,» *ACI Materials Journal*, vol. 96, n° %13, MAY-JUNE1999.
- [12] M. KHALED, «Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performance des Bétons Autonivelants,mémoire de Maitrise et Sciences Appliquées.Spécialite:Génie Civil,» Université de Sherbrooke,CANADA, Septembre,1995.
- [13] B. N. M.LACHEMI, «Béton Autoplaçants;Synthèse biliogrzhphique, Rapport de recherche CEBTP,» chez 98-004/98-006, Centre Saint-Remy, juillet 1999.
- [14] B. N. M.LACHEMI, «Self-Compacting Concrete Incorporation High Volume of Class F Fly Ash: Preliminary Results, Cement and Concrete Research 31,» 2001.

- [15] M. R. KHALIFA, «Effet de L'attaque Sulfatique Externe Sur la Durabilité Des Bétons autoplaçants,» chez *thèse en cotulelle internationale* , centre de Recherche sur la matière Divisée-Orléans/ laboratoire de Génie Civil-costantine, 2009, p. 25.
- [16] P. TURCRY, «Retrait et Fissuration des BAP,Influence de la formulation,» chez *thèse doctorat*.
- [17] R. G. Khare, «Prediction of compressive strength of concrete by various non destructive tests methods,» Essar Engineering Center, Mumbai, 15p.
- [18] R. R. F. Feidman, «Essais non destructifs du béton,» CBD-187-F, 2005, 6p..
- [19] K. A. BENYAHIA, «Corrélations entre Essais non Destructifs et Essais Destructifs du Béton à Faible Résistance,» Faculté de Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Civil, Mai 2010.
- [20] P. B. I. ., M. F. A. N. Bin Ibrahim, «Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,» International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002, 242p..
- [21] A. E. HILALI, «Etude Experimentale de laRHEOLOGIE et du Comportement de Béton autoplaçant (BAP): influence des Fines calcaires et des Fibres Vegetales,» Laboratoire de Mécanique Matériaux du Génie Civil-L2MGC EA4114, 5 Mail Gay-Lussac,Neuville sur Oise 95031Cergy Pontoire Cedex, Décembre 2009.
- [22] K. O. H. Okamura, «Mix design for self compacting concrete,» Concrete library of JSCE, (1995), pp. pp 107-120.
- [23] Y. E. M. Ouchi, «A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar's particles in self-compacting concrete,» *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol. volume 21, pp. pp 1-6., 1999.
- [24] Y. M. a. K. Y. M. HAYAKAWA, «Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan,» Las Vegas, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, 1995, pp. pp.381-397.
- [25] S. N. a. H. FUJIWARA., «“Self compacting property of highly flowable concrete,» las Vegas, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology,, 1995, pp. ACI 154-20, pp. 301-314.
- [26] T. Sedran., «Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants,» Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 1999.
- [27] J. Jin, «Properties of mortar for self compacting concrete,» In PhD thesis,University of

London, 2002, p. page 398..

[28] S. Bethmont, «Mécanismes de ségrégation dans les BAP,» In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2005.

[29] Maillard, 1997.

[30] s. soumaila, «béton à base de recyclats: influence du type de recyclats et de la formulation,» 2013.

[31] P. TURCRY, «retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de la formulation,» 2004 .

[32] «[www.mfg.com/fr/manufacturing-knowledge-centre/metmechanical/fonderie-moulage-au-sable](http://www.mfg.com/fr/manufacturing-knowledge-centre/metmechanical/fonderie-moulage-au-sable),» [En ligne].

[33] «[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=sable\\_\(fonderie\)&oldid=14651034](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=sable_(fonderie)&oldid=14651034),» [En ligne].

[34] T. P, «retrait de fissuration des bétons autoplaçant influence de la la formulation,» n° %11, 2004.