

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département Génie Civil*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

FILIERE : Génie Civil

**Spécialité : Matériaux en Génie Civil**

Par

- **KOULL Oualyeddine**
- **MEZAACHE Akram.**

*Intitulé*

*Influence des paramètres de durabilité sur la réponse mécanique  
par indentation instrumentée des bétons autoplacants.*

*Soutenu le : 01/07/2023*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. ROKBANE Abdelmadjid</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. ABDEMEZIANE Nabil</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. LOGZIT Nacer</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BENTOUMI Mohamed</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2022/2023*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# **Remerciements**

*La Première chose on remercie le Dieu pour le succès Qu'il nous a donné la volonté et la patience tout au long de la période d'études.*

*En second lieu nous remercions aussi nos encadreurs :*

**Mr. BENTOUMI Mohamed, et Mr. LOGZIT Nacer** pour l'orientation, la confiance et la patience tout le long de ce travail. Nous tenons à remercier vivement toute personne qui a aidé à l'élaboration et la réalisation de ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos parents, amis et collègues.*

# ***Dédicace***

*C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents. Mes frères et Mes sœurs, toute*

*ma famille. Et mes amis*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un*

*jour avec un Master en Génie Civil.*

# ***SOMMAIRE***

<b>CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LE BETON AUTO-PLAÇANT .....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 HISTORIQUE .....	1
<b>2 DEFINITION DE BETON AUTOPLAÇANT.....</b>	<b>2</b>
2.1 DOMAINE D’UTILISATION DES BAP .....	3
2.2 LES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BAP .....	3
2.3 CAHIER DES CHARGES D’UN BAP .....	4
<b>3 PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES BAP .....</b>	<b>5</b>
3.1 MATERIAUX DE BASE.....	5
3.1.1 Granulats.....	6
3.1.2 Ciment .....	6
3.1.3 Différents types de ciments.....	6
3.1.4 Eau de gâchage.....	7
3.2 ADDITIONS MINERALES .....	7
3.3 FILLERS CALCAIRES .....	8
3.4 POZZOLANES NATURELLES.....	8
3.5 LAITIER DE HAUT FOURNEAU.....	8
3.6 ADJUVANTS CHIMIQUES .....	9
3.6.1 Effets et performances des adjuvants : .....	9
3.6.2 Super-plastifiants.....	11
<b>4 PROPRIETES DES BAP A L’ETAT FRAIS.....</b>	<b>12</b>
4.1 REMPLISSAGE .....	12
4.2 RESISTANCE A LA SEGREGATION .....	13
4.3 CAPACITE DE PASSAGE.....	13
<b>5 CARACTERISATION DES BAP A L’ETAT FRAIS.....</b>	<b>14</b>
5.1 ESSAI D’ETALEMENT.....	14
5.2 ESSAI DE STABILITE AU TAMIS .....	16
5.3 ESSAI DE LA BOITE EN L .....	17
<b>6 CARACTERISATION D’UN BAP A L’ETAT DURCI .....</b>	<b>17</b>
6.1 ESSAIS DESTRUCTIFS DU BETON.....	18

6.1.1	Essais de compression .....	18
<b>7</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>19</b>
	<b>CHAPITRE 02 : PARAMETRES DE DURABILITE .....</b>	<b>25</b>
<b>1</b>	<b>DEFINITION.....</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>POROSITE .....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>MASSE VOLUMIQUE .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>CALCUL DE LA POROSITE ET LA MASSE VOLUMIQUE .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>27</b>
	<b>CHAPITRE 03 : INDENTATION INSTRUMENTEE .....</b>	<b>28</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>28</b>
1.1	ESSAI D'INDENTATION .....	29
1.2	PRINCIPE .....	29
<b>2</b>	<b>INDENTATION INSTRUMENTEE.....</b>	<b>30</b>
2.1	DEFINITION .....	30
2.2	TECHNIQUE ET ANALYSE.....	30
2.3	PHASES DURANT L'ESSAI D'INDENTATION.....	30
2.4	SEQUENCES DE L'INDENTATION VICKERS .....	31
	<b>CHAPITRE 04 : TRAVAIL EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>METHODE DE FORMULATION PRATIQUE DES BAP.....</b>	<b>38</b>
2.1	EXEMPLE PRATIQUE POUR UN BAP 35 .....	39
2.1.1	Composant du BAP 35 (voir tableau suivant) .....	40
2.2	EXEMPLE PRATIQUE POUR UN BAP 40.....	40
2.2.1	Composant du BAP 40 (voir tableau suivant) .....	42
2.3	EXEMPLE PRATIQUE POUR UN BAP 45 .....	42
2.3.1	Composant du BAP 45 (voir tableau suivant) .....	43
<b>3</b>	<b>ESSAIS DE CARACTERISATIONS DU BETON AUTO-PLAÇANT A L'ETAT FRAIS.....</b>	<b>43</b>
3.1	ESSAI D'ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS [NF EN 12 350-8] .....	44
3.1.1	Résultat d'essai d'étalement .....	44
3.2	ESSAI DE STABILITE AU TAMIS [NF EN 12 350-11].....	45
3.2.1	Résultat d'essai de stabilité au tamis.....	46
3.3	ESSAI DE LA BOITE EN « L » [NF EN 12 350-10] .....	46

3.3.1	Résultat d'essai de la boîte en « L ».....	47
<b>4</b>	<b>ESSAIS DE CARACTERISATIONS DU BETON AUTO-PLAÇANT A L'ETAT DURCI.....</b>	<b>48</b>
4.1	ESSAI DE COMPRESSION [NF EN206-1] .....	48
4.2	CALCUL DE LA POROSITE ET LA MASSE VOLUMIQUE .....	48
4.3	ESSAI D'INDENTATION .....	51
	<b>CHAPITRE 05 : ANALYSE DE RESULTATS .....</b>	<b>55</b>
<b>1</b>	<b>INDUCTION.....</b>	<b>55</b>
<b>2</b>	<b>ANALYSE DE RESULTAT.....</b>	<b>55</b>
2.1	RESISTANCE DES BETONS EN FONCTION DE E/C.....	55
2.2	RESISTANCE DES BETONS EN FONCTION DE LA MASSE VOLUMIQUE .....	56
2.3	RESISTANCE DES BETONS EN FONCTION DE LA POROSITE .....	56
2.4	COURBES D'ESSAI D'INDENTATION .....	57
2.4.1	Variation de la ténacité Kc en fonction de la charge appliquée P (BAP 35).....	57
2.4.2	Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 35) .....	57
2.4.3	Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P(BAP 35).....	58
2.4.4	Variation de la ténacité Kc en fonction de la charge appliquée P (BAP 40).....	58
2.4.5	Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 40) .....	59
2.4.6	Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP 40).....	59
2.4.7	Variation de la ténacité Kc en fonction de la charge appliquée P (BAP 45).....	60
2.4.8	Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 45) .....	60
2.4.9	Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP 45).....	61
2.4.10	Variation du la ténacité en fonction de la masse volumique.....	61
2.4.11	Variation du la ténacité en fonction de la porosité .....	62
2.4.12	Variation du la ténacité en fonction de la résistance à la compresion .....	63

# Liste des figures

## Chapitre 1

Figure 1. 1 : Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO [7] .....	4
Figure 1. 2 : (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant [17].....	12
Figure 1. 3: Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [21].....	15
Figure 1. 4:Essai de stabilité au tamis [18]. .....	16
Figure 1. 5:Essai de la boîte en L (L-box test) [23].....	17
Figure 1. 6:Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire [28].....	18
Figure 1. 7:Mesure de la résistance à la compression.....	19

## Chapitre 3

Figure 2. 1:Schéma de l'essai d'indentation. ....	29
Figure 2. 2:Description d'un essai d'indentation à une vitesse de chargement et déchargement constante.....	31
Figure 2. 3 : Représentation schématique des séquences et des systèmes de fissures d'un verre induits par indentation Vickers [25,26].....	33

## Chapitre 4

Figure3. 1 : Formule de bolomey .....	40
Figure 3.2: essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8] .....	44
Figure 3. 3:les galettes d'étalement des BAP .....	45
Figure 3.4:essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11] .....	45
Figure 3. 5:résultat d'essai de stabilité au tamis des BAP .....	46
Figure 3. 6:essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10] .....	47
Figure 3. 7:résultat d'essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10] .....	47
Figure 3. 8:machine de compression .....	48
Figure 3. 9:la pesée hydrostatique .....	50
Figure 3. 10:la machine utilisé dans l'essaie d'indentation .....	51
Figure 3. 11 : Empreinte obtenue après essai d'indentation.....	53

## Chapitre 5

Figure 4. 1 : Résistance des bétons en fonction de E/C .....	55
Figure 4. 2 : Résistance des bétons en fonction de la masse volumique.....	56
Figure 4. 3 : Résistance des bétons en fonction de la porosité .....	56
Figure 4. 4 :Variation de la ténacité Kc en fonction de la charge appliquée P (BAP35).....	57
Figure 4. 5 : Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 35) .....	57
Figure 4. 6 :Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P(BAP35).....	58
Figure 4. 7 :Variation de la ténacité Kc en fonction de la charge appliquée P (BAP40).....	58
Figure 4. 8 : Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 40) .....	59
Figure 4. 9 : Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP40).....	59
Figure 4. 10 : Variation de la ténacité Kc en fonction de la charge appliquée P (BAP45).....	60
Figure 4. 11 : Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 45) .....	60
Figure 4. 12 : Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP45).....	61
Figure 4. 13 : Variation du la ténacité en fonction du la masse volumique .....	62
Figure 4. 14 : Variation du la ténacité en fonction du la porosité .....	62
Figure 4. 15 : Variation du la ténacité en fonction du la résistance à la compression .....	63

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

Tableau 1 : Différents types d'adjuvants pour béton. [16] .....	10
Tableau 2 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP [19]. .....	14

## Chapitre 4

Tableau 3 : formulation de BAP 35 .....	40
Tableau 4 : formulation de BAP 40 .....	42
Tableau 5 : formulation de BAP 45 .....	43
Tableau 6 : résultat d'essai d'étalement .....	44
Tableau 7 : résultat d'essai de stabilité au tamis .....	46
Tableau 8 : résultat d'essai de la boîte en « l » .....	47
Tableau 9 : résultat d'essai de compression .....	48
Tableau 10 : résultat de mesure de Msec .....	49
Tableau 11 : résultat de mesure de Mair .....	49
Tableau 12 : résultat de mesure de Meau .....	50
Tableau 13 : résultat de $\rho$ et $\varepsilon$ .....	50

# Liste des abréviations

<b>BAP</b>	Béton auto plaçant
<b>BO</b>	Béton ordinaire
<b>BAHP</b>	Béton auto-plaçant haute performances
<b>SP</b>	super-plastifiant
<b>FS</b>	fumée de silice
$\varepsilon$	Porosité
$\rho$	La masse volumique
<b>C</b>	ciment
<b>E</b>	eau
<b>KC</b>	La ténacité
<b>HV</b>	La dureté
<b>Po</b>	La charge d'indentation
<b>Dm</b>	Longueur de l'empreinte en $\mu\text{m}$
<b>Rc</b>	Résistance à la compression
<b>Kc</b>	Ténacité
<b>P<sub>0</sub></b>	La charge d'indentation
<b>Hv</b>	La dureté
$\beta$	Constante
$\Theta$	L'angle entre les faces d'indenteur
<b>E</b>	Le module de young
<b>A<sub>0</sub></b>	Constante
<b>°0</b>	Constante

## **Résumé :**

Dans ce travail on s'intéresse à l'obtention d'un modèle de corrélation numérique, permettant de prédire les caractéristiques mécaniques des bétons par tests d'indentation, sur la base des paramètres de durabilité d'un béton autoplaçant. Le modèle à proposer sera déduit sur la base de la caractérisation de trois familles des bétons : BAP 35, BAP 40 et BAP 45. Le résultat attendu permet de prédire le comportement mécanique des bétons, en connaissant les seuls paramètres de durabilité (porosité ou masse volumique). L'avantage de cette démarche est de valoriser l'approche d'indentation dans le domaine de Génie Civil.

**Mots- clés :** BAP, Porosité, indentation, réponse mécanique, Corrélation numérique, Modèle.

## **Abstract:**

The aim of this work is to develop a numerical correlation model for predicting the mechanical properties of concrete using indentation tests, based on the durability parameters of a self-compacting concrete. The model to be proposed will be deduced on the basis of the characterization of three families of concretes: SCC 35, SCC 40 and SCC 45. The expected result will make it possible to predict the mechanical behavior of the concretes, knowing only the durability parameters (porosity or density). The advantage of this approach is to enhance the value of the indentation approach in the field of Civil Engineering.

**Key words:** SCC, Porosity, Indentation, Mechanical response, Numerical correlation, Model.

## **ملخص**

الهدف من هذا العمل هو تطوير نموذج الارتباط العددي للتنبؤ بالخصائص الميكانيكية للخرسانة باستخدام اختبارات المسافة البادئة، بناءً على معايير المتانة للخرسانة ذاتية الدك. سيتم استنتاج النموذج المقترح على أساس توصيف ثلاث عائلات من الخرسانة: **BAP 35** و **BAP 40** و **BAP 45**. وستتيح النتيجة المتوقعة التنبؤ بالسلوك الميكانيكي للخرسانة، انطلاقاً من خصائص الديمومة فقط (المسامية أو الكثافة). تتمثل ميزة هذا النهج في تعزيز قيمة طريقة المسافة البادئة في مجال الهندسة المدنية.

**الكلمات المفتاحية: BAP ، المسامية، المسافة البادئة ، الاستجابة الميكانيكية ، الارتباط العددي ، النموذج.**

# Introduction Générale

Le béton est devenu un matériau omniprésent, tant dans le monde de la construction que dans d'autres domaines tels que l'art. A la fois économique et facilement manipulable, le béton répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité et sa résistance font de lui un matériau incontournable dans le domaine de la construction. Sa composition peut être variable, ce qui permet d'obtenir un béton répondant à des besoins spécifiques. Aujourd'hui, un nouveau matériau BAP apparu dans les années 90. Il représente un avantage particulier par rapport au béton ordinaire qui, se propage dans le renforcement confiné, atteint tous les coins du coffrage et est consolidé sous son seul propre poids. Le béton auto plaçant (BAP) offre une excellente capacité de remplissage et présente une bonne résistance à la rupture et une bonne résistance aux essais mécaniques. Il est utilisé dans les domaines de recherche industrielle, les entreprises, les usines de préfabrication pour la réalisation de bâtiments ou de structures de génie civil.

La technique d'indentation est largement répandue dans les laboratoires industriels. Actuellement, elle est devenue un instrument de base pour caractériser les propriétés mécaniques de différents matériaux. La caractérisation du béton (BAP) dépend de l'état de surface, donc de la méthode de préparation. Pour pouvoir visualiser précisément la qualité d'image du (BAP) après chaque test d'indentation, la forme du béton doit être plate et convenablement polie.

Notre objectif consiste en premier lieu, à préparer l'échantillon et procéder au processus de fabrication de surface à savoir : le sciage, le rodage et le polissage. En second lieu, nous présentons les résultats comparatifs obtenus lors de l'estimation du facteur d'intensité de contrainte (Ténacité), et trouver une relation entre l'indentation et les paramètres de la durabilité des BAP

Ce mémoire comportera cinq chapitres

Les premiers trois chapitres incluent dans la partie théorique qui est une synthèse bibliographique de la littérature. Elle englobe la définition d'un béton autoplaçant, de ses composants, des propriétés recherchées, les méthodes de formulation d'un BAP, les essais de

caractérisation à l'état frais et à l'état durci, la durabilité des BAP et des recherches sur l'indentation.

Les deux derniers chapitres incluent dans la partie expérimentale, la finalité est de préparer les échantillons et procéder expérimentalement à la fabrication de ces matériaux utilisés, et l'ensemble des essais effectués au laboratoire et l'analyse des résultats des essais.

---

# Chapitre 01

---

Généralités sur le béton auto-  
plaçant

## Chapitre 01 : Généralités sur le béton auto-plaçant

### 1 Introduction

Depuis leur apparition au Japon à la fin des années '80, les bétons autoplaçants ont été progressivement utilisés partout en Europe. Leurs qualités les destinent à un bel avenir dans de nombreuses applications qu'il s'agisse de bétons prêts à l'emploi ou de produits préfabriqués en usine. Il n'existe cependant pas encore en Belgique de document permettant une spécification adéquate de ce matériau. C'est pourquoi, un groupe de travail de la Plate-forme Béton s'est attaché à préparer des recommandations afin de spécifier de manière univoque un béton autoplaçant et de caractériser sa consistance, son homogénéité et son absence de ségrégation, tout en restant dans le cadre de la norme NBN EN 206-1: 2001 « Béton - Spécification, performances, production et conformité » et de son supplément NBN B 15-001 : 2004. C'est ainsi que des procédures d'essais simples et applicables aussi bien en centrale à béton qu'en usine de préfabrication et sur chantier sont proposées. Ces recommandations sont provisoires, dans la mesure où elles pourront être complétées en fonction de l'amélioration de nos connaissances, notamment en matière d'essais de caractérisation, et en fonction de l'expérience acquise. [1] L'invention de ce type de béton a pour but de remplacer les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications.

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux à haute performance qui se caractérisent essentiellement par leur fluidité à l'état frais et leur homogénéité à l'état durci. Ces bétons ont la capacité de se mettre en place sous l'effet de la gravité, sans apport de vibration même dans les coffrages très ferrailés. L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été rapidement reprise par les grands groupes industriels Japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure.

#### 1.1 Historique

Les bétons autoplaçant furent développés pour la première fois au Japon durant l'année 1988. Ils ont depuis été améliorés et utilisés dans de nombreux ouvrages de construction. Le principe du béton autoplaçant est simple : on rajoute au béton un agent super plastifiant afin d'augmenter de manière importante sa maniabilité. Le béton peut donc se placer dans les coffrages sous la simple force de la gravité. Inversement, un béton ordinaire, moins maniable, a plutôt tendance à former des nids de caillou ou des vides lorsqu'il est coulé [2]. Et rapidement adoptée par de grands groupes industriels japonais (Kajima, Taisei, Obayashi, etc.) pour des projets d'envergure.

L'intérêt de ces entreprises pour ce type de béton a plusieurs raisons pratiques et économiques :

- Facilité de mise en place ainsi que la possibilité d'utiliser des coffrages avec formes complexes et une forte densité d'armatures.

- Amélioration de la qualité du béton (résistance et durabilité).

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océan polis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraiillés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication.

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

## 2 Définition de béton autoplaçant

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

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.

Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires. Ils comportent un fort dosage en sable, en ciment et en éléments fins, ainsi que des ajouts chimiques et minéraux qui permettent de modifier leurs propriétés. Les granulats utilisés doivent être de diamètre limité pour prévenir la formation des voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. [3.4.5]

Les propriétés caractéristiques de BAP sont :

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Des aérations du béton pendant son écoulement.
- Excellente aptitude au béton homogène en présence de réservations d'incorpores et de ferrailages denses.

## 2.1 Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. [6]

Le béton autoplaçant, malgré le fait qu'il soit fréquent d'usage dans les constructions au sol, peut aussi se retrouver dans les fondations superficielles, les poutres ou les poteaux, la construction des dalles et des radiers, ou encore le coulage de plafonds chauffants.

En résumé, il peut être utilisé dans n'importe quel chantier où le coulage doit être facilité, avec un mélange homogène des composantes du béton sans même avoir recours à une méthode de vibration quelconque.

Néanmoins, ce béton liquide ne peut convenir à des ouvrages en pente du fait de leur consistance inappropriée. Du béton classique devra être utilisé dans ce cas pour faire tenir une structure de ce type.

Les principales raisons d'utilisation de BAP :

- Densités de ferrailage importantes.
- Formes et géométries complexes : voiles, courbes.
- Voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts.
- Voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Exigences architecturales et qualité de parement particulière.

## 2.2 Les avantages et inconvénients des BAP

**Les avantages :**

Le BAP cela nous donne plusieurs avantages on cite :

### a) Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Rendements améliorés et exécution plus rapide.

**b) Avantages écologiques :**

- Valorisation des déchets de construction par la récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage
- Diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire
- Réduction des nuisances sonores durant l'exécution.

**c) Avantages techniques :**

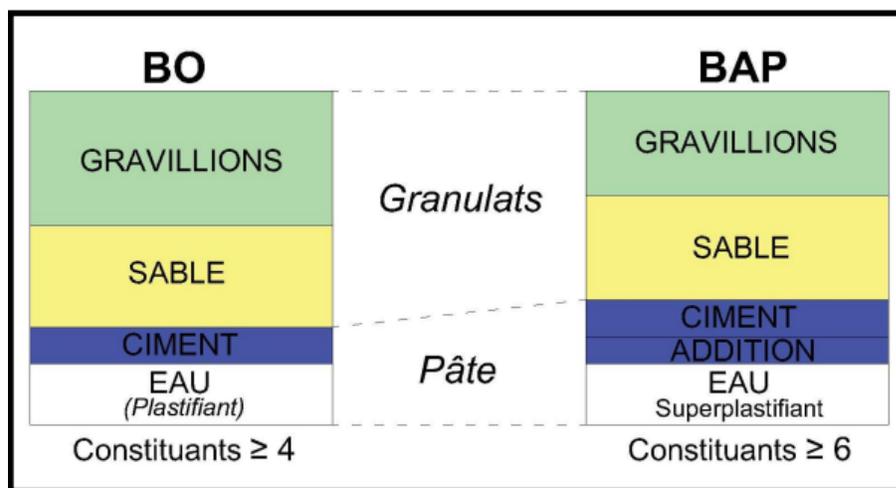
- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- Réalisation d'éléments de forme complexe.
- Bétonnage en milieux fortement ferrailés.

**Les inconvénients :**

La raison essentielle qui ne favorise pas l'utilisation des BAP est due au fait que l'utilisation de super-plastifiant et de fines étant nécessaire, ceci se traduit par une augmentation du coût.

**2.3 Cahier des charges d'un BAP****Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO**

Pour parvenir au cahier de charges précédentes, les BAP sont formulés différemment des BO (fig 1.1). Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau, de l'air et d'une addition minérale, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche.



**Figure 1. 1 :** Comparaison de la structure d'un BAP et d'un BO [7]

La spécialité des BAP réside dans leur fraîcheur. En effet, ce type de béton doit avoir une grande maniabilité et une grande déformabilité tout en conservant sa stabilité. Ces qualités contribuent à garantir des conceptions durables et de haute qualité.

Le cahier des charges suivant décrit les propriétés rhéologiques exigées pour un BAP :

Une dalle de béton doit couler facilement et en douceur sous son propre poids afin de rester en place. Si l'écoulement est fait correctement, le béton se comportera comme un fluide, avec une faible contrainte de cisaillement et une faible viscosité, L'écoulement doit se faire sans apport de vibration, au travers de zones confinées et coffrages complexes.

Le béton doit être suffisamment solide pour résister à la ségrégation dynamique (c'est-à-dire lorsque le mortier coule autour des pierres) afin de rester homogène. Si le mortier n'est pas assez solide, les pierres peuvent le cisailer, et elles entreront en contact les unes avec les autres, ce qui provoquera la formation de voûtes par contact solide. Cela bloquera l'écoulement du mortier et le béton sera moins uniforme.

### **3 Principaux constituants des BAP**

Les constituants de la pâte d'asphalte liant (BAP) peuvent être très différents de ceux du béton bitumineux (BO). Ils peuvent différer dans leurs proportions, ainsi que dans leur choix de liant et de granulométrie. Ceci est particulièrement important si vous souhaitez produire une pâte d'asphalte de haute qualité.

En général, les composants utilisés dans la fabrication de BAP peuvent être divisés selon

Utilisez-les dans trois catégories.

#### **3.1 Matériaux de base**

Composants de base du béton ( Le ciment, les granulats et l'eau)

### 3.1.1 Granulats

Le choix des granulats pour les BAP est très important. Il s'agit en fait de déterminer leur granulométrie permettant de minimiser le plus possible le volume d'air dans le but d'améliorer les propriétés du béton.

Les granulats se divisent principalement en deux catégories soient les gravillons ( $\Phi > 5$  mm) et le sable ( $\Phi \leq 5$  mm).

Dans le cas des BAP, les gravillons sont essentiellement caractérisés par leur dimension maximale, cette dimension étant principalement limitée à 20 mm afin d'empêcher le risque de blocage lors de la mise en place. Les gravillons roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. En outre, le sable recommandé à la confection des BAP doit comporter des quantités assez fortes d'éléments fins ( $\Phi \geq 0.125$  mm), dans la plage de 4 à 8 %. Ainsi, ses grains passants au tamis de 2 mm doivent être compris entre 38 et 42 % [8].

Cette optimisation de sable permet d'améliorer le comportement rhéologique des BAP, mais elle entraîne un surcoût supplémentaire.

### 3.1.2 Ciment

Tous les types normalisés de ciment conviennent pour la fabrication de BAP. Cependant, l'utilisation du ciment Portland (qui ne contient que du clinker) nous laisse toute latitude pour diversifier et contrôler la quantité d'additifs minéraux introduits. Les analyses chimiques et minéralogiques du ciment sont d'une grande importance, mais souvent transparentes pour l'utilisateur car elles sont réalisées en cimenterie et sont des critères d'assurance qualité.

### 3.1.3 Différents types de ciments

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [15] :

**CEM I: Ciment Portland (CPA).** Le ciment CEM I également appelé ciment Portland, contient au minimum 95 % de clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires.

**CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).** Les ciments CEM II (A ou B), contiennent au minimum 65 % de clinker et au maximum 35 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice » (limitée à 10 %), la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc. Les ciments CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.

**CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).** Les CEM III A, B ou C également appelé Ciment de Haut-Fourneau, sont principalement obtenus grâce au mélange de 5 à 64 % de clinker avec 36 à 95 % de laitier de haut-fourneau.

**CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).** Les CEM IV A ou B sont des ciments de type pouzzolanique. Ils sont constitués de 45 à 89 % de clinker et de 11 à 55 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice », le schiste calciné, la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc.

**CEM V : Ciment composé (CLC).** Les CEM V A ou B sont des ciments qui contiennent entre 20 et 64 % de clinker, 18 à 50 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes.

### 3.1.4 Eau de gâchage

Pour être adaptée à la fabrication du BAP, l'eau de gâchage ne doit contenir aucun composé susceptible d'attaquer chimiquement le ciment, le granulats ou l'armature, ni aucune matière en suspension susceptible d'altérer ses propriétés d'origine. L'analyse chimique de l'eau non potable peut être nécessaire à cette fin pour détecter des niveaux excessifs de ces contaminants.

## 3.2 Additions minérales

L'emploi des pouzzolanes minérales pour faire des mortiers et des bétons est connu 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 [9] :

### 3.3 Fillers calcaires

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80  $\mu\text{m}$ , sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaires naturelles ou non. [10]

Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation [11].

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du liant, les fillers calcaires doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieur à 75 % en masse. [12]

### 3.4 Pouzzolanes naturelles

Les pouzzolanes naturelles, substances finement broyées ont une finesse à peu près identique à celles du ciment, sont généralement d'origine volcanique ou des roches sédimentaires. Elles n'ont pas des propriétés hydrauliques intrinsèques mais, en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux libéré par le clinker à la cour de son hydratation, elles forment, elles aussi des hydrates stables et peu solubles dans l'eau. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques [13], Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice réactive (dans des proportions supérieures à 25 %), d'alumine et d'oxyde de fer. [12]

### 3.5 Laitier de haut fourneau

C'est un coproduit de la production de la fonte. Dans le procédé de fabrication, dans les hauts fourneaux, le laitier surnage au-dessus de la fonte, et se vitrifie rapidement après refroidissement. Le broyage de ce dernier (à environ 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  à 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) donne ce qu'on appelle le laitier vitrifié moulu. Il est utilisé comme ajout cimentaire s'il est conforme à la norme : NF P 18-506 « Additions pour béton hydraulique. Laitier vitrifié moulu de haut fourneau ».

La composition chimique du laitier est relativement constante, car pour permettre le refroidissement de la fonte la composition chimique des matières premières doit être bien ajustée. Tandis que sa composition minéralogique dépend de son mode de refroidissement, un laitier est d'autant plus vitreux que le refroidissement est rapide. [14]

Les fumées de silice jouent un rôle particulier dans la formulation du béton du fait, d'une part, de leur composition (taux de silice supérieure à 70%), d'autre part, de leur finesse (supérieure à 10 000 m<sup>2</sup>/kg).

Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO<sub>2</sub>. La fumée de silice possède des propriétés pouzzolaniques s'avérant plus élevées que celles des pouzzolanes naturelles en raison de sa forte teneur en silice amorphe.

### 3.6 Adjuvants chimiques

Les ajouts chimiques sont des adjuvants qui, incorporés au béton modifient une ou plusieurs de ses propriétés à l'état frais ou durci. Etant constitués le plus souvent de produits tensio-actifs, il suffit donc de très faibles proportions du produit pour provoquer des modifications importantes des propriétés du béton, notamment si le dosage prescrit par le fabricant est respecté. Pour certains types d'adjuvants, et pour un dosage moindre, le même adjuvant peut présenter une fonction secondaire.

L'ouvrabilité, d'autre part elles permettent au béton de tenir au gel et de mieux résister aux sels de déverglaçage. [14]

Il existe plusieurs types des ajouts chimiques :

- Adjuvant plastifiant –réducteur d'eau
- Adjuvant super plastifiant –haut réducteur d'eau
- Adjuvant rétenteur d'eau Adjuvant rétenteur d'eau
- Adjuvant entraîneur d'air
- Adjuvants accélérateurs de prise
- Adjuvants accélérateurs de durcissement
- Adjuvants retardateurs de prise
- Adjuvants hydrophobants

#### 3.6.1 Effets et performances des adjuvants :

Le tableau I.1 résume les différents types d'adjuvants ainsi que leurs performances par rapport un béton témoin. [16]

**Tableau 1** : Différents types d'adjuvants pour béton. [16]

Adjuvant	Effet(s)	Performances par rapport à un béton témoin
Plastifiant réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	$\geq 5\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 7 et 28 jours	$\geq 110\%$
Superplastifiant haut réducteur d'eau	Réduction du dosage en eau	$\geq 12\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 1 jour	$\geq 140\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 28 jours	$\geq 115\%$
	Augmentation de l'affaissement au cône d'Abrams	$\geq 120 \text{ mm}$
Rétenteur d'eau	Diminution de la quantité d'eau ressuée	$\leq 50\%$
Entraîneur d'air	Augmentation de la quantité d'air entraîné	$\geq 2,5\%$
Accélérateur de prise	Augmenter le temps de début de prise à 20°C	$\geq 30 \text{ min}$
	Diminution du temps de début de prise à 5°C	$\leq 60\%$
Accélérateur de durcissement	Augmentation de la résistance à la compression à 24h à 20°C	$\geq 120\%$
	Augmentation de la résistance à la compression à 48h à 5°C	$\geq 130\%$
Retardateur de prise	Augmenter le temps de début de prise	$\geq 90 \text{ min}$
	Diminuer le temps de fin de prise	$\leq 360 \text{ min}$
Hydrophobant	Absorption capillaire pendant 7 jours après 7 jours de conservation	$\leq 50\%$

Sur le BAP l'Adjuvant chimique le plus important est le super-plastifiant.

### 3.6.2 Super-plastifiants

Il permet de réduire le dosage en eau et ainsi d'augmenter la résistance mécanique du béton.

La réduction du dosage en eau et l'augmentation de l'affaissement sont plus marquées. L'augmentation de la résistance à la compression à 1 jour est supérieure à celle de 28 jours, ceci s'explique par un effet thermique accélérant les réactions d'hydratation du ciment.

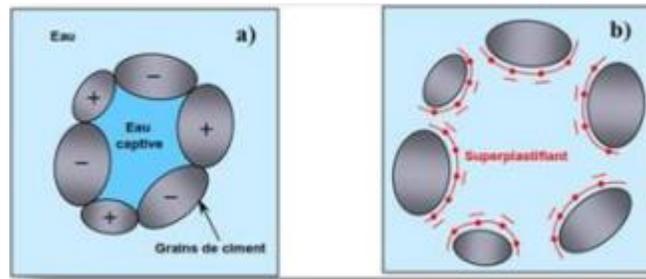
Les super- plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fillers en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau., ainsi les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est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

Le niveau élevé de l'ouvrabilité requis par les bétons autoplaçants tout en maintenant la stabilité du mélange a mené à l'utilisation d'un certain nombre d'adjuvants dans le béton. La demande élevée en eau pour réaliser une fluidité requise par le béton autoplaçant, était impraticable compte tenu du dosage très élevé de ciment qui était souvent requis pour les résistances à la compression souhaitées. L'arrivée des super-plastifiants et la technologie de développements de ces adjuvants, ont joué un rôle essentiel dans le développement des bétons autoplaçants. Les super-plastifiants modernes (basés sur les éthers poly carboxyliques) favorisent la conservation de la fluidité souhaitée tout en maintenant la stabilité du mélange béton. Ces supers plastifiants réalisent ce qui est montré dans **la figure 1.2**, avec un mécanisme de répulsion électrostatique en combinaison avec l'obstacle stérique. Le mode d'action des super plastifiants 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.

Les super plastifiants en s'adsorbant à la surface des grains de ciment brisent cette dynamique. Ils neutralisent les différentes charges et donnent la même charge électrostatique à chaque grain de ciment. Ces charges de même signe vont créer des forces répulsives entre les particules et, par conséquent, la dispersion des grains de ciment libère de l'eau qui est maintenant disponible à la lubrification du mélange d'où l'augmentation de la maniabilité. [17]



**Figure 1. 2 :** (a) Pâte de ciment non adjuvante, (b) Pâte de ciment additionnée d'un superplastifiant. [17]

#### 4 Propriétés des BAP à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage. [18]

##### 4.1 Remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations.

Le remplissage est observé sous deux aspects, la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage, le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace, le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton, le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects. [19]

#### **4.2 Résistance à la ségrégation**

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions. [20]

La ségrégation peut donc se manifester concrètement de différentes manières, par ex. B. Séparation du mortier du granulat, séparation du gravier et du mortier, ce qui peut entraîner un colmatage dans des zones confinées et une répartition inégale de l'air.

Pour éviter la ségrégation, réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton. La résistance à la ségrégation du béton peut également être augmentée en augmentant la viscosité de l'eau dans le mortier avec certains améliorants de viscosité.

#### **4.3 Capacité de passage**

Les bétons autoplaçants doivent allier fluidité (remplissabilité) et résistance à la ségrégation pour assurer une bonne coulabilité. Cependant, dans les espaces confinés, le béton doit pouvoir s'écouler dans les espaces restreints et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. [19]

Par conséquent, un béton est considéré comme auto-plaçant lorsqu'il répond aux propriétés ci-dessus et trouve le bon compromis entre les propriétés presque contradictoires de coulabilité et de résistance à la ségrégation.

Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le **tableau 2**.

**Tableau 2 :** Propriétés d'ouvrabilité des BAP [19].

Propriétés d'un BAP	Moyens D'obtention	Actions A mener dans la formulation
Remplissage (Fluidité)	Réduction des frictions entre les particules ----- Optimisation de la pate	Augmentation des volumes de pate Utilisation des superplastifiants ----- Optimisation du rapport e/c
Resistance a la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport e/c ----- Utilisation des matériaux de grande surface ----- Utilisation d'agent de viscosité
Resistance a la ségrégation	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport e/c ----- Utilisation d'agent de viscosité ----- Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction de volume de gravier ----- Réduction de la taille maximale des granulats

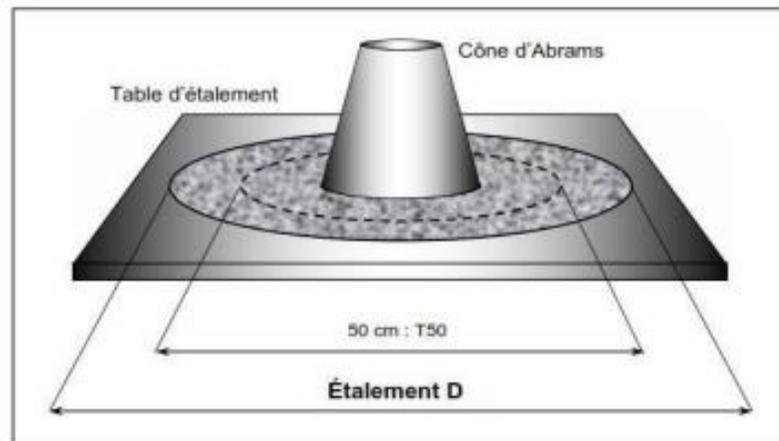
## 5 Caractérisation des BAP à l'état frais

### 5.1 Essai d'étalement

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (**Figure2.1**).

Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute,

ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP. [21]



**Figure 1. 3:** Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [21].

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçant :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette.
- En traçant à la truelle des lignes dans la « galette », on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement.
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône.
- Une forme bombée de la « galette » traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident la formulation, expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes. [10]

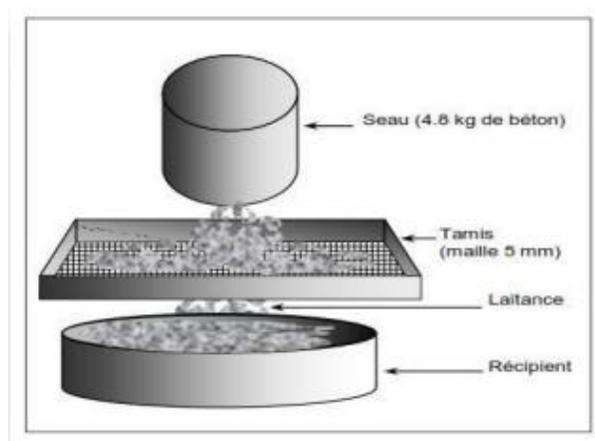
## 5.2 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (**Figure2.2**). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier. [18]

Ce test intègre les tests utilisés pour évaluer la mobilité en milieu fermé ou non en déterminant la stabilité. Elle consiste à déterminer le pourcentage massique de coulis de ciment (**P laitance**) dans un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2$  kg) passé au tamis de 5 mm.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes [21] :

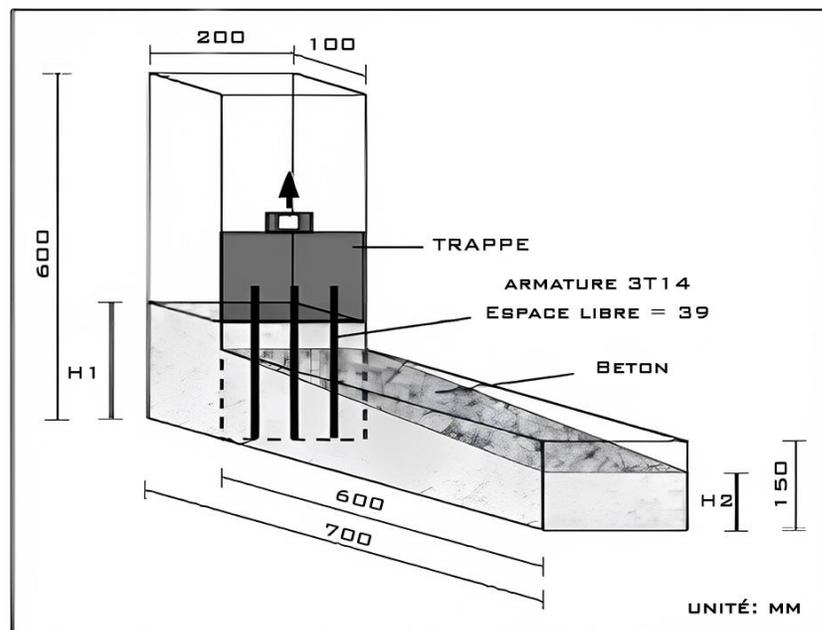
- $0\% \leq \% P \text{ laitance} \leq 15\%$  : stabilité satisfaisante.
- $15\% < \% P \text{ laitance} \leq 30\%$  : stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ.
- $\% P \text{ laitance} > 30\%$  : stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



**Figure 1. 4:**Essai de stabilité au tamis. [18]

### 5.3 Essai de la boîte en L

Ce test permet de caractériser la mobilité en milieu clos, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. La partie verticale du L (**Figure 1.5**) est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres  $\varnothing 14$ ) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre deux barres).



**Figure 1. 5:**Essai de la boîte en L (L-box test). [23]

Pour que le béton autoplaçant soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H/L$  max) doit être supérieur à 0,8. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton. [23]

## 6 Caractérisation d'un BAP à l'état durci

Le béton doit être soumis à deux types essais mécaniques de caractérisation :

Les essais destructifs :

- Les essais de compression.
- Les essais de traction par flexion.
- Module d'élasticité.

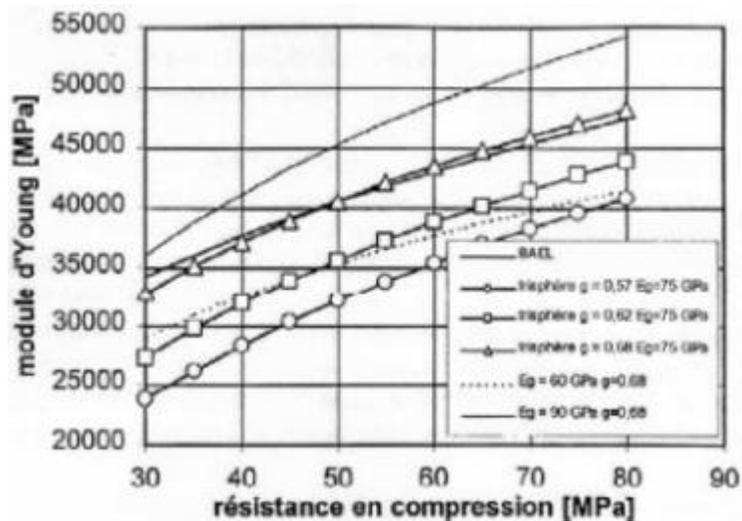
Les essais non destructifs :

- Essai au scléromètre.
- Essai d'auscultation dynamique.

## 6.1 Essais destructifs du béton

### 6.1.1 Essais de compression

Les essais de mesure de résistance à la compression sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 16x32 cm selon les prescriptions de la norme ou sur des éprouvettes de dimensions 10x10x10 cm. Ce test fournit une force de compression [N] qui provoque la rupture de l'éprouvette.



**Figure 1. 6:** Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire [28]



**Figure 1. 7:**Mesure de la résistance à la compression.

## 7 Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été réalisée dans le but de connaître le béton autoplaçant, de le définir, de nommer leur nombreuse propriété.

Le béton autoplaçant est un béton compacté par gravité sans apport d'énergie de compactage.

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont : sa capacité à traverser des espaces restreints, le BAP a une excellente capacité à remplir les moindres recoins du coffrage avec du béton homogène, même avec des armatures épaisses. Cela élimine le travail fastidieux associé aux vibrations. Il a également une fluidité et une viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation. Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques standards sont développés pour caractériser le BAP vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité, et ses performances mécaniques.

## Références Bibliographiques

[1] C. PLOYAERT, éditeur responsable : J.P. JACOBS << FEBELCEM - Fédération de l'Industrie Cimentière Belge >> rue Volta 8 , 36 août 2005

[2] B.PATRICK et L.Philippe << Site internet : <https://technobeton.wordpress.com> >> 12 décembre 2016

[3] PH.TURCRY et A.LOUKILI, << Différentes approches pour la formulation des BAP, revue française de génie civil volume 7 n°4 >> 2003.

[4] PH.TURCRY << Retrait et fissuration des BAP : influence de la formulation, thèse de doctorat, l'école centrale de Nantes de l'université de Nantes >> février 2004.

[5] HOLCIM, << Le béton autocompactant, recommandation >> Suisse, novembre 2005.

[6] NF ISO 14577-3 "Metallic materials instrumented indentation test for hardness and other materials parameters", part 3, Calibration of reference test pieces, pdf, 2003.

[7] M. YAGOUB, « matériaux de construction (chapitre 2) », cours en génie civil, université Mohamed Khaider à Biskra, 2009.

[8] M.T.LAUGIER, << New formula for indentation in ceramics >>, J. Mater. Sci. Letts., 6, p.355, 1987.

[9] N.BRAHIM, << Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants , Mémoire de magister >> Université de Mohamed Khider –Biskra, 2006

[10] H.ZAIDI et L.SAADOUNE << MEMOIRE SUR Caractérisation mécanique d'un béton auto plaçant à partir d'un essai d'indentation >> univ BBA 2019/2020

[11] M.ADAM << Propriétés des bétons >>, Livre Version française traduit par CRIB. Edition Eyrolles, page 824, 2000.

[12] S.ABDERRAHMANE, << Etude de la durabilité des systèmes béton armé mortiers de réparation en milieu marin>>, Thèse de Doctorat. Université de l'Université de La Rochelle, 2013.

[13] G.DREUX, J.FESTA , << Nouveau guide du béton et de ses constituants >>, 8<sup>ème</sup> Édition. Eyrolles. Mai 1998

[14] N.REBBOUH « Mémoire de Fin d'Etudes sur Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant >> ecole nationale polytechnique , 2006

[15] H.FARES, Thèse de doctorat en Génie Civil << Propriétés mécaniques et physicochimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée >> ,Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2009

[16] J.BARON et J-P.OLLIVIER, << Les bétons : bases et données pour leur formulation >>, Eyrolles, 1999.

[17] M.BAALBAKI, << Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants >>, Thèse de Doctorat. Université de Sherbrooke, Québec, Septembre 1998.

[18] H.SAMOUH , E.ROZIERE et A. LOUKILI, << Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP) >>, Conférence XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012

[19] S.NASRI, << Caractérisation aux moyens des essais non destructifs (NDT) et Essai direct d'un béton autoplaçant(BAP) à base de matériaux locaux (effet de la nature du sable) >>, Mémoire de Magister. Université de Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.

[20] C.LEGRAND, <<La structure des suspensions de ciment, Le Béton Hydraulique >>, Presses de l'ENPC, 1982.

[21] NF EN 12350–9, << Essai pour béton frais - Partie 9 : béton auto-plaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V >>, 2010

[22] C. BELGHIT, << CONTRIBUTION A LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT A BASE DE MATERIAUX LOCAUX Effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité >>, Mémoire de Magister. Université BADJI-MOKHTAR-ANNABA, 2009.

[23] Association Française de Génie Civil « AFGC », Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002.

[24] M.BETHMONT, << Mécaniques de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) >>, Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Décembre 2005.

[25] T.SEDRAN, << Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons auto-nivelant >>, Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Ponts ET Chaussées, p 220, 1999.

[26] G.PONS, E.PROUST ET S.ASSIE << Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete>>, Proceedings of 3 International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 aout 2003.

[27] O.HADDAD, << Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants>>, 1 er Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton à Alger, 24- 26 Mai 2004.

[28] F.LARRAR , A.BELLOG, << L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons >>, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées , N ° 219, jan-Fév1999, pp 41-52.

[29] S.BENADDAD , N. BENATSOU, << Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) >>, Mémoire de Master. Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.

[30] PH.TURCRY et A.LOUKILI, << Différentes approches pour la formulation des BAP >>, revue française de génie civil volume 7 n°4, 2003.

[31] Z. ABIB,<< Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants >>, thèse de magister USTHB, 2004.

[32] A.DAOUD, << Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton autoplaçant contribution à la modélisation numérique de l'interface >>, thèse de doctorat, INSA Toulouse, juin2003.

---

# Chapitre 02

---

Paramètres de durabilité

## Chapitre 02 : Paramètres de durabilité

### 1 Définition

La durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel-dégel.

Les propriétés microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- Grand volume de pâte.
- La présence d'additions en grande quantité.
- Un réseau plus ou moins dense de bulles d'air.

Il y a plusieurs facteurs paramètre de durabilité comme :

- Perméabilité au gaz.
- Diffusion des ions chlore.
- Absorption capillaire.
- Carbonatation.
- Attaques sulfatiques externes.
- Les cycles de gel-dégel.

Mais dans le BAP et le béton en général, on peut déclarer que le paramètre du premier ordre qu'il faut suivre est la porosité.

### 2 Porosité

La porosité du béton est une mesure de sa capacité à absorber et à retenir l'eau. Cela dépend de plusieurs facteurs tels que la qualité des matériaux utilisés, le rapport eau/ciment, le type de ciment et les techniques de production. La porosité du béton est généralement exprimée en pourcentage. Le béton est généralement considéré comme un matériau poreux avec une porosité typique

comprise entre 5 % et 20 %. Cela signifie qu'une partie du volume de béton est constituée de vides ou de pores, qui peuvent ou non être interconnectés. Plus la porosité est élevée, plus le béton est susceptible d'absorber de l'eau, ce qui peut entraîner des problèmes de durabilité tels que la corrosion des armatures ou la détérioration par le gel/dégel. Pour réduire la porosité du béton, il est possible d'utiliser des additifs spéciaux, des adjuvants ou des charges qui obstruent les pores et réduisent l'absorption d'eau. De plus, des techniques de cure appropriées peuvent également aider à minimiser la porosité du béton et à améliorer sa résistance et sa durabilité.

### 3 Masse volumique

La masse volumique du béton est une caractéristique importante à prendre en compte lors de la conception de structures, car elle affecte directement leur poids, leur résistance et leur durabilité. La masse volumique du béton peut varier en fonction de sa composition et de ses proportions. En général, la masse volumique du béton auto-plaçant se situe généralement entre 2200 et 2500 kg/m<sup>3</sup>.

### 4 Calcul de la porosité et la masse volumique

Cette méthode permet la mesure de la porosité, la masse volumique apparente et la pesée hydrostatique. Mode de fonctionnement conforme à la norme (NF EN 18-459). Cette mesure assure la porosité globale d'un matériau, est considérée comme la base de toute caractérisation microstructurale ou évaluation des propriétés de résistance du matériau.

Pour la saturation, les échantillons d'essai ont d'abord été séchés dans une étuve à 105°C jusqu'à ce que leur poids se stabilise. Ensuite, nous les mettons dans un sèche-linge pendant 4 heures. Ils sont ensuite immergés dans de l'eau à 20°C.

L'équation de la masse volumique apparente  $\rho$  exprimée en kilogramme par mètre cube :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau} \quad (1)$$

L'équation de La porosité  $\varepsilon$  exprimée en pourcentage volumétrique :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (2)$$

$M_{sec}$ : La masse de l'échantillon sec,  $M_{air}$  : la masse de l'échantillon humide,  $M_{eau}$  : la masse hydrostatique de l'échantillon.

## 5 Conclusion

La synthèse bibliographique nous a donné une idée générale des BAP, maintenant on sait que les BAP sont des bétons très fluides qui oscillent par eux-mêmes, mais avoir deux propriétés contradictoires à la fois, comme la fluidité et la stabilité, serait tout aussi difficile que leurs formulations soient complexes. Pour obtenir une fluidité aussi élevée, on utilise un agent d'écoulement dont l'excès peut provoquer une démixtion, bien que l'utilisation d'améliorants de viscosité ou d'une grande quantité d'additifs minéraux puisse contrecarrer ce phénomène.

Sur la base des recherches menées sur le BAP, on peut conclure que l'utilisation d'additions minérales améliore les propriétés du BAP à l'état frais et séché.

La durabilité des bétons autoplaçants est sujet d'actualité, il s'intéresse à la caractérisation des indicateurs qui peuvent influencer directement sur la structure poreuse du BAP. La porosité est un paramètre clé qui peut donner une vision globale plus réaliste du comportement des BAP vis-à-vis des agressions chimiques. Dans la présente étude on pense que c'est le paramètre du premier ordre qu'il faut suivre pour caractériser la durabilité du béton en général.

---

# Chapitre 03

---

Indentation instrumentée

## Chapitre 03 : Indentation instrumentée

### 1 Introduction

L'indentation est un outil ancien mentionné par Huygens dans le *Traité de la lumière*. L'intérêt pour cette propriété s'est accru, que ce soit pour protéger les objets des rayures ou, à l'inverse, pour les polir.

Depuis les années 1980, une cavité instrumentale a émergé qui a conduit au développement de ces techniques de caractérisation mécanique des surfaces. De nombreuses conférences et numéros spéciaux de revues spécialisées sont consacrés à ce sujet [1]. L'outil de pénétration est utilisé pour caractériser et analyser les propriétés mécaniques de surface de divers matériaux, tels que par ex : Dureté H, module de Young E et/ou ténacité à la rupture.

Généralement, cette technique est utilisée pour estimer la dureté (KIC) des matériaux fragiles. Chaque méthode utilise des formules dérivées d'une corrélation empirique entre la résistance à la rupture, c'est-à-dire H la taille des fissures provoquées par l'indentation, et les études menées en mécanique classique de la rupture. Cela conduit à une dispersion importante de l'incertitude de mesure, qui peut aller jusqu'à 50 %. [2]

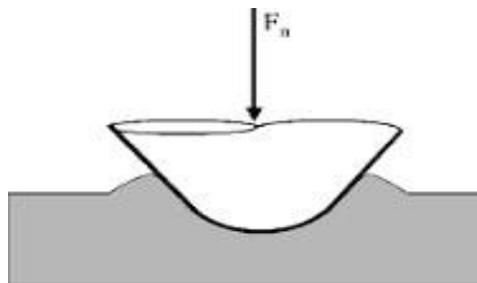
De plus, le comportement et les modèles de fissures sur les matériaux fragiles et métalliques pendant le passage cyclique peuvent être examinés [3,4]. Dans ses recherches sur le carbure de tungstène, Palmqvist [5] a tenté d'établir une relation empirique entre l'énergie nécessaire à la formation de fissures et la ductilité. Lawn et al. [6,7] montrent une corrélation entre la taille des fissures formées après indentation et la résistance aux chocs mesurée avec des techniques mécaniques classiques. Evans et al. [8] montrent l'effet des contraintes résiduelles, qui peuvent être estimées à l'aide du test de poussée [9,10].

Des essais en profondeur instrumentés montrent des instabilités, dites pop-ins, dans les courbes de charge, qui correspondent à la fissuration et sont éventuellement liées à la dureté du matériau [11,12].

## 1.1 Essai d'indentation

### 1.2 Principe

Le principe du test d'indentation consiste à déposer un pénétrateur de forme connue (sphère, cône ou pyramide) sur la surface du matériau à tester (Fig. 1.1). Sous l'action de la charge de choc. Le pénétrateur pénètre dans le matériau et provoque des déformations élastiques et plastiques dans la zone de contact. Après dégageement, une trace résiduelle subsiste.



**Figure 2. 1:**Schéma de l'essai d'indentation.

La dureté est définie par la relation suivante :

$$H = P/A \quad (1,1)$$

Où

H : La dureté exprimée en MPa.

P : La charge exprimée en Newton (N).

A : L'aire de l'empreinte exprimée en mm<sup>2</sup>.

Il existe deux méthodes pour mesurer la dureté d'un matériau. Ils diffèrent par la manière dont la zone de pénétration est déterminée : soit par pénétration conventionnelle (analyse de pénétration après retrait du pénétrateur) soit par pénétration instrumentale (à partir d'analyse de courbe de pénétration de charge après essai de pénétration).

## 2 Indentation instrumentée

### 2.1 Définition

L'indentation instrumentée est une technique utilisée pour déterminer la dureté et le module d'élasticité des matériaux en fonction de certains paramètres comme la charge, la température et le temps. Elle est employée pour étudier le comportement mécanique de différents matériaux tels que : le béton (BO, BAP, BAHP), les verres, (céramiques ou métalliques) et les composés intermétalliques [13]. Ont été publiés sur l'étude du comportement de rupture dans la céramique

[14,15], du comportement mécanique des couches minces [16-17], des os [18], les efforts résiduels.

[19] et le comportement dans les polymères [20-21].

### 2.2 Technique et analyse

La technique d'indentation instrumentée permet de construire la courbe charge-indentation du test d'indentation. La phase de chargement correspond à la pénétration du pénétrateur et la phase de déchargement correspond au retrait du pénétrateur (Fig. 2.1). Selon cette figure, la courbe d'indentation renseigne sur les propriétés élastiques et plastiques des matériaux [22]. Deux phénomènes peuvent être observés lors de la décharge. Tout d'abord, tout le corps subit un retour élastique. Selon les propriétés élastoplastiques des matériaux, il est possible qu'une partie du solide irrégulier se replastifie lors de la décharge. Cependant, la courbe de décharge renseigne principalement sur l'élasticité du matériau. [23]

### 2.3 Phases durant l'essai d'indentation

La figure 2.1 illustre un essai d'indentation Vickers qui, se décompose en trois phases :

- Première phase (charge) :

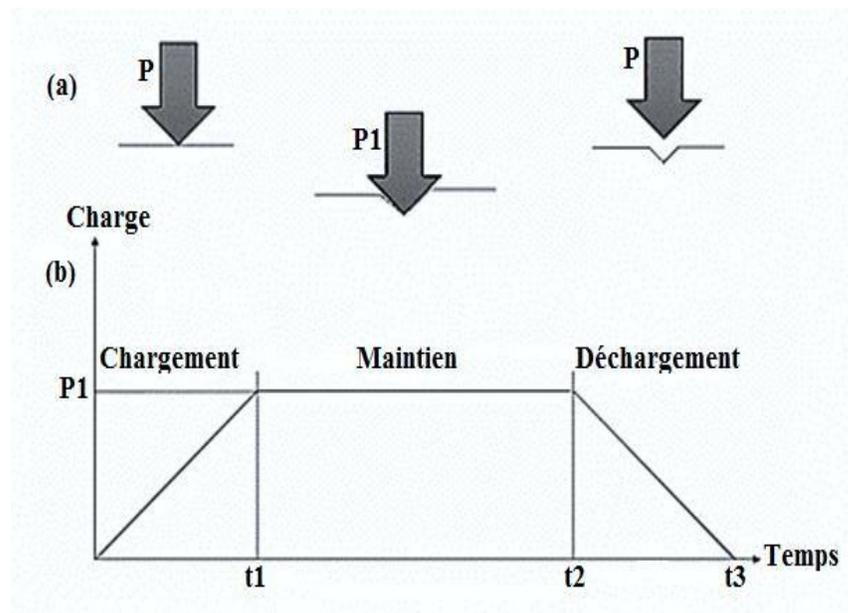
Une fois le contact réalisé, la charge augmente progressivement, le pénétrateur descend jusqu'à atteindre le seuil correspondant à l'effort maximum ou au déplacement maximum.

- Deuxième phase (maintenir) :

Charge maximale maintenue pendant le temps demandé.

- Troisième phase (déchargement) :

La charge est progressivement réduite jusqu'à ce qu'elle soit soulevée, c'est-à-dire H le pénétrateur n'est plus en contact avec l'éprouvette. Selon le type d'essai, le chargement et le déchargement peuvent être contrôlés en force ou en déplacement, et le seuil établi en fin de chargement et pendant la maintenance peut être contrôlée en force ou en déplacement. [24]



**Figure 2. 2:**Description d'un essai d'indentation à une vitesse de chargement et déchargement.

- Mouvement du pénétrateur et interaction avec la matière.
- Charge en fonction du temps [24].

## 2.4 Séquences de l'indentation Vickers

La figure 2.2 montre les tests effectués sur le verre. Les cycles de charge et de décharge du pénétrateur pointu peuvent être décrits comme suit :

- Début de chargement :

Le pénétrateur pointu crée une zone de plasticité irréversible.

b) Charge critique :

À une certaine charge critique, un ou plusieurs défauts de la zone de déformation plastique deviennent instables, entraînant une fissuration centrale. Les cercles se développent sous le pénétrateur selon les plans contenant les diagonales de l'empreinte et l'axe de charge.

c) Croissance stable :

La fissure centrale se propage régulièrement sous contrainte.

d) Début de déchargement :

La médiane de la fissure se ferme lorsque le champ élastique diminue. Cependant, en même temps, ils s'ouvrent en surface sous l'action des contraintes résiduelles.

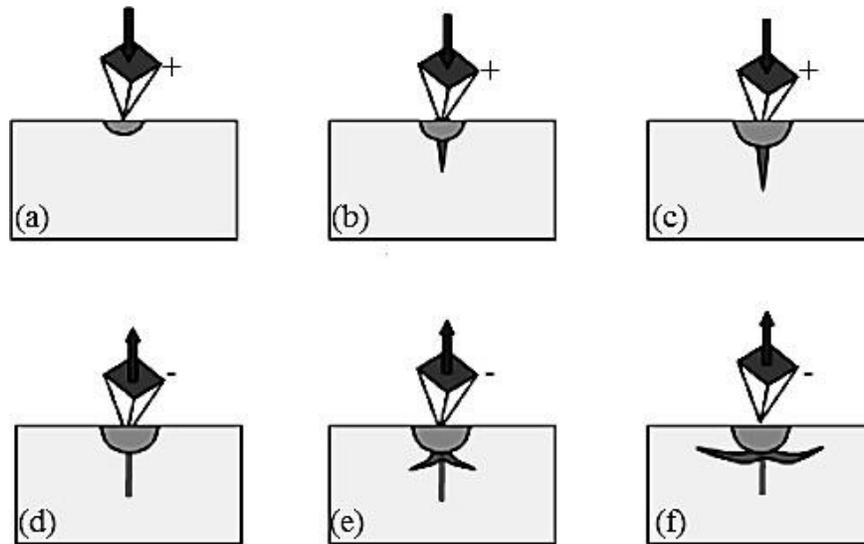
e) Influence des contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles lors du déchargement continuent d'induire des fissures radiales et d'initier des fissures latérales à la base de la zone de déformation avant que le déchargement ne soit terminé. Ils se développent dans un cercle parallèle à la surface.

f) Déchargement complet :

Les deux systèmes se propagent vers la fin de la décharge et tendent à former un demi-cercle.

[25,26]



**Figure 2. 3 :** Représentation schématique des séquences et des systèmes de fissures d'un verre induits par indentation Vickers. [25,26]

## Conclusion

Un bref aperçu de l'histoire du test de presse est donné, en commençant par la présentation du test de dureté lui-même, qui détermine clairement la dureté du matériau. L'instrumentation du test il y a une trentaine d'années a conduit à ce "Indentation instrumentale" qui consiste à suivre l'évolution de la force d'appui en fonction de la profondeur de l'empreinte.

Différentes méthodes de caractérisation mécanique des matériaux basées sur la technique d'excavation sont présentées dans cette bibliographie. Les tests d'immersion instrumentés ont l'avantage d'être presque non destructifs et de nécessiter peu de préparation d'échantillon. Dans ce travail, un essai de pénétration instrumenté permettra la caractérisation mécanique de Plaques d'abord non déformées puis déformées.

De manière générale, la technique de l'indentation est utilisée pour évaluer la résistance aux chocs avec différentes méthodes basées sur la mesure de la longueur des fissures en fonction des contraintes appliquées au matériau. Ce dernier peut être modifié en remplaçant le rapport module d'élasticité sur dureté par le rapport énergie de déformation élastique sur énergie totale.

### Références Bibliographiques

- [1] E. BARTHEL, D. CHICOT, J.P. GUIN, E. LE BOURHIS, G. MAUVOISIN, << L'indentation : un outil de caractérisation multi-échelle des matériaux >> Commission thématique Indentation France, SF2M, 2014.
- [2] A.IOST, << Détermination de la ténacité de matériaux fragiles ou ductiles à partir de l'essai d'indentation >> Revue. Métal, Vol.110, pp.215-233, 2013.
- [3] GD. QUINN, RC. BRADT, << On the Vickers indentation fracture toughness test >> J. A. Cer.Soc, Vol. 90, pp.673-680, 2007.
- [4] R.MORRELL, << Fracture toughness testing for advanced technical ceramics: internationally agreed good practice >> A. Ap. Cer, Vol.105, pp.88-89, 2006.
- [5] S.PALMQVIST, << A method to determine the toughness of brittle materials, especially hard materials >> Jernkontorets. Ann. Vol.141, p.303, 1957.
- [6] B.R.LAWN, M.V.SWAIN, << Micro fracture beneath point indentations in brittle solids >> J. Mat.Sci, Vol.10: pp.113, 1975.
- [7] BR.LAWN, DB.MARSHALL, << Hardness, toughness and brittleness indentation analysis >> J. A .Cer Soc, Vol.62, pp.347-50, 1979.
- [8] A.G. EVANS, T.R. WILSHAW << Quasi-static solid particle damage in brittle solids >> Acta Metall, Vol.24, pp.939, 1976.
- [9] M. V. SWAIN, J.T.HAGAN, J.E.FIELD << Determination of the surface residual stresses in tempered glasses by indentation fracture mechanics indentation >> J. Mater. Sci, Vol. 12, pp. 1914-1917, 1977.

- [10] F. PETIT, A. C.SARTIEAUX, M. GONON, F. CAMBIER << Fracture toughness and residual stress measurements in tempered glass by indentation >> Acta. Materialia, Vol.55, pp.2765-2774, 2007.
- [11] M.J.REECE, F. GUIU<< Repeated indentation method for studying cyclic fatigue in ceramics >> J. A .Cer .Soc, Vol 73, N°4, pp.1004-1013, 1990.
- [12] W. GERBERICH, S. VENKATARAMAN, H. HUANG, S. E. HARVEY, D. L. KOHLSTEDT, << The injection of plasticity by millinewton contacts >> Acta Metallurgica Et Materialia, Vol. 43, N°. 4, p. 1569, 1995.
- [13] M.R. VANKANDINGHAM << Review of instrumented indentation >> Jour .Res. Nat.Ins.Stand.Tech., Vol.108, N°.4, pp.249-265, 2003.
- [14] D.R. CLARKE, R. TANDON << Factors affecting the fracture resistance of silicon nitride ceramics >> Mater. Sci. Eng., A 195, p.207, 1995.
- [15] G.M. PHARR << Measurement of mechanical properties by ultra-load indentation >> Mater. Sci. Eng., A 253 (1-2), p.151, 1998.
- [16] T.Y. TSUI, G.M. PHARR << Substrate effects on nano-indentation mechanical property measurement of soft films on hard substrates >> J. Mater. Res, Vol.14, N°.1, p.292, 1999.
- [17] R. SAHA , W. D. NIX << Effects of the substrate o the determination of thin film mechanical properties by nano-indentation >> Acta Mater, Vol.50, N°.1, p.23, 2002.
- [18] Z. FAN, J. G. SWADENER, J. Y. RHO, M. E. ROY, AND G. M. PHARR << Anisotropic properties of humaintibial cortical bone as measured by nano-indentation >> J. Orthopaed. Res, Vol.20, N°.4, p.806, 2002.
- [19] J.G. SWADENER, B. TALJAT, G.M. PHARR << Measurement of residuel stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters >> J. Mater. Res., Vol.16, N°.7, p.2091, 2001.

[20] S.A.S ASIF , J.B. PETHICA << Nano-scale indentation creep testing at no ambient temperature >> J.Adhesion., Vol.67, N°4, p.153, 1998.

[21] B. J. BRISCOE, L. FIORI, AND E. PELILLO << Nano-indentation of polymeric surfaces >>J.Appl. Phys Vol.31, N°.19, p.2395, 1998.

[22] J.L. LOUBET, J.M. GEORGES, G. MEILLE << Vickers indentation curves of elastoplastic materials.

Microindentation techniques in Material Science and Engineering >> ASTM STP889, P.J. BLAN and

B.R. LAWN, Eds, Amer.Soc, Test and Mater, Philadelphia, p.72, 1986.

[23] K.L. JOHNSON << Contact Mechanics >> Cambridge University Press, p.452, 1987.

[24] B.CEDRIC << Indentation et rhéologie de verres inorganique de 20 à 700°C >> Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 2006.

[25] V.LE HOUEROU << Rayabilité des verres silico-sodo-calciques >> Thèse de doctorat, Université de Rennes1, 2005.

[26] K.VINCENT << Contribution à l'étude des mécanismes de déformation et de fissuration des verres >> Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à diriger des recherches, Volume1 : Présentation de l'activité scientifique, Laboratoire de Recherche en Mécanique Appliquée de l'Université de Rennes I, 2008.

---

# Chapitre 04

---

Travail expérimental

## **Chapitre 04 : Travail expérimental.**

### **1 Introduction**

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie consiste à préparer les échantillons et procéder expérimentalement la fabrication de ces matériaux utilisés.

Dans la première partie on a préparé les trois formulations des BAP 35, BAP 40, BAP 45.

Dans la deuxième partie on a fait les essais classiques (l'état durci et frais) sur les BAP et aussi bien que l'essai d'indentation.

### **2 Méthode de formulation pratique des BAP**

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 est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Dans l'industrie du bâtiment, on utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa, et par expérience on sait que ces résistances dites « ordinaires » sont facilement atteintes par les bétons autoplaçants.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.

- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

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

### 2.1 Exemple pratique pour un BAP 35

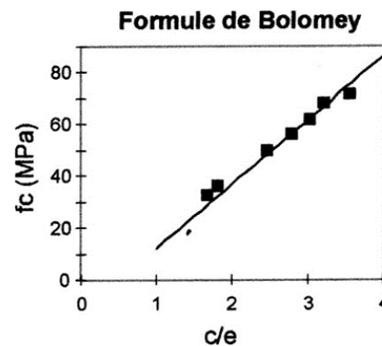
Pour une résistance du BAP à 28 Jours de l'ordre de 35 MPa :

On pose  $G/S = 1$ .

Dosage en ciment : On utilise l'approche de Bolomey (voir la figure3. 1) :  $C/E = 1,75$ , D'où  $E/C = 0,57$ .

Avec un dosage en ciment de 350 Kg/m<sup>3</sup>, on aura une quantité d'eau égale à :

$$350/1,75 = 200 \text{ Litres.} / C = 350/3,1 = 113 \text{ Litres.}$$



**Figure3. 1** : Formule de bolomey [1]

Le volume de pate est fixé à une valeur de 370 Litres /m<sup>3</sup>.

$$\text{Pate} = C + FS + E.$$

D'où la quantité du FS est de :  $370 - (350/3,1 + 200) = 370 - 313 = 57$  Litres.

$$FS = 57 \text{ litres} = 57 \times 2,52 = 144 \text{ Kg.}$$

SP est fixé pour un dosage de saturation,

On propose une valeur constante de 2,02 %C :

$$SP = [2,02 \times 350] / 100 = 7,1 \text{ Kg.}$$

$$G/S = 1.$$

$$G + S = 1000 - 5 - 113 - 200 - 57 = 625 \text{ l.}$$

$$G = 312,5 \text{ Litres} = 312,5 \times 2,65 = 828 \text{ Kg.}$$

$$S = 312,5 \text{ Litres} = 312,5 \times 2,60 = 813 \text{ Kg.}$$

$$G/S = 828 / 813 = 1,02 \text{ Proche de } 1.$$

### 2.1.1 Composant du BAP 35 (voir tableau suivant)

Pour 1 m<sup>3</sup> du BAP et Pour le mélange (03 éprouvette 16/32 + 03 éprouvettes 7 x 7 x 28) :

**Tableau 3** : formulation de BAP 35.

BAP 1 (35)	1 m <sup>3</sup>	0,03 KLG
c	350	10,5
e	200	6,851
FS	144	4,32
SP 2,02%	7,1	0,213
s	813	24,34
g 3/8	412,5	12,37
g 8/15	415,63	12,46

## 2.2 Exemple pratique pour un BAP 40

Pour une résistance du BAP à 28 Jours de l'ordre de 40 MPa :

On pose  $G/S = 1$ .

Dosage en ciment : On utilise l'approche de Bolomey (voir la figure3. 1) :  $C/E = 2$ ,

D'où  $E/C = 0,5$ .

Avec un dosage en ciment de 400 Kg/m<sup>3</sup>, on aura une quantité d'eau égale à :

$$400/2 = 200 \text{ Litres. / } C = 400/3,1 = 129,03 \text{ Litres.}$$

Le volume de pate est fixé à une valeur de 370 Litres /m<sup>3</sup>.

$$\text{Pate} = C + \text{FS} + E.$$

D'où la quantité du FS est de :  $370 - (400/3,1 + 200) = 370 - 329,03 = 40,97 \text{ Litres.}$

$$\text{FS} = 40,97 \text{ litres} = 40,97 \times 2,52 = 103,24 \text{ Kg.}$$

SP est fixé pour un dosage de saturation,

On propose une valeur constante de 4.32 %C :

$$\text{SP} = [4,32 \times 400] / 100 = 17,3 \text{ Kg.}$$

$$G/S = 1.$$

$$G + S = 1000 - 5 - 129,03 - 200 - 40,97 = 625 \text{ l.}$$

$$G = 312,5 \text{ Liters} = 312,5 \times 2,65 = 828 \text{ Kg.}$$

$$S = 312,5 \text{ Liters} = 312,5 \times 2,60 = 813 \text{ Kg.}$$

$$G/S = 828 / 813 = 1,02 \text{ Proche de } 1.$$

### 2.2.1 Composant du BAP 40 (voir tableau suivant)

Pour 1 m<sup>3</sup> du BAP et Pour le mélange (03 éprouvette 16/32 + 03 éprouvettes 7 x 7 x 28) :

**Tableau 4** : Formulation de BAP 40.

BAP 2 (40)	1 m <sup>3</sup>	0,03 KLG
c	400	12
e	200	6
FS	103,24	3,1
SP 4.32%	17.3	0,519
s	813	24,39
g 3/8	412,5	12,37
g 8/15	415,63	12,46

### 2.3 Exemple pratique pour un BAP 45

Pour une résistance du BAP à 28 Jours de l'ordre de 45 MPa :

On pose G/S = 1.

Dosage en ciment : On utilise l'approche de Bolomey (voir la figure3. 1) : C/E = 2,25

D'où E/C = 0,44.

Avec un dosage en ciment de 450 Kg/m<sup>3</sup>, on aura une quantité d'eau égale à :

$$450/2.25 = 200 \text{ Litres. / } C = 450/3,1 = 145.16 \text{ Litres.}$$

Le volume de pate est fixé à une valeur de 370 Litres /m<sup>3</sup>.

$$\text{Pate} = C + FS + E.$$

D'où la quantité du FS est de :  $370 - (450/3,1 + 200) = 370 - 345,16 = 24.84 \text{ Litres.}$

$$FS = 24,84 \text{ litres} = 24.84 \times 2,52 = 62.6 \text{ Kg.}$$

SP est fixé pour un dosage de saturation,

On propose une valeur constante de 2.08 %C :

$$SP = [2.08 \times 450] / 100 = 9.37 \text{ Kg.}$$

$$G/S = 1.$$

$$G + S = 1000 - 5 - 145.16 - 200 - 24.84 = 625 \text{ l}$$

$$G = 312,5 \text{ Litres} = 312,5 \times 2,65 = 828 \text{ Kg.}$$

$$S = 312,5 \text{ Litres} = 312,5 \times 2,60 = 813 \text{ Kg.}$$

$$G/S = 828 / 813 = 1,02 \text{ Proche de } 1.$$

### 2.3.1 Composant du BAP 45 (voir tableau suivant)

Pour 1 m<sup>3</sup> du BAP et Pour le mélange (03 éprouvette 16/32 + 03 éprouvettes 7 x 7 x 28) :

**Tableau 5 : formulation de BAP 45.**

BAP 3 (45)	1 m <sup>3</sup>	0,03 KLG
c	450	13,5
e	200	6
FS	62,6	1,878
SP 2.08%	9.37	0,281
s	813	24,39
g 3/8	412,5	12,37
g 8/15	415,63	12,46

## 3 Essais de caractérisations du béton auto-plaçant à l'état frais

Tests proposés par l'AFGC, actuellement utilisés comme référence en l'absence de normalisation. Les résultats de ces tests permettent de présenter une image qualitative du BAP.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

Mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).

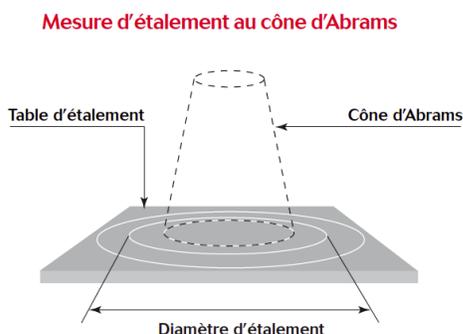
Mobilité en milieu confiné (décrite par l'essai d'écoulement à la boîte en L).

Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

### 3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams [NF EN 12 350-8]

La fluidité et la mobilité du BAP en milieu non confiné sont caractérisées par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow). Le matériel utilisé pour réaliser cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis de le soulever et de mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue (2 mesures correspondant à 2 diamètres perpendiculaires). Plus le diamètre est grand, plus le matériau est fluide.

Des valeurs de l'ordre de 60 à 75 cm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. L'étalement doit être défini en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre. Cet essai est utilisé pour la mise au point de la formulation du BAP. [1]

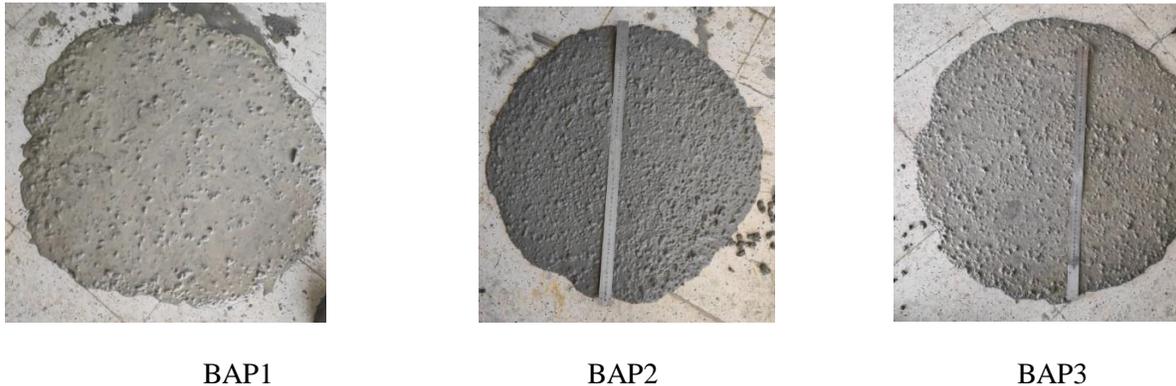


**Figure 3. 2:** Essai d'étalement au cône d'Abrams [2]

#### 3.1.1 Résultat d'essai d'étalement

**Tableau 6 :** résultat d'essai d'étalement.

BAP	l'étalement 1 (cm)	l'étalement 2 (cm)	l'étalement moyen (cm)
1	70	67	68,5
2	60	65	62,5
3	70	68	69



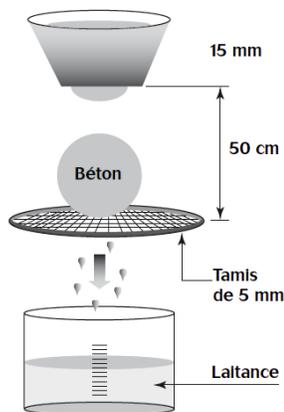
**Figure 3. 1:** Galettes d'étalement des BAP.

### 3.2 Essai de stabilité au tamis [NF EN 12 350-11]:

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation « statique » et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Au bout de 15 min, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

Le pourcentage en masse de laitance passée à travers le tamis, par rapport à la masse de l'échantillon initial, exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %. Plus il est faible, plus le béton est stable. Au-delà de 20 %, le béton présente un risque de ségrégation. [1]

#### Essai de stabilité au tamis



**Figure 3. 2:** Essai de stabilité au tamis. [3]

### 3.2.1 Résultat d'essai de stabilité au tamis

**Tableau 7** : résultat d'essai de stabilité au tamis.

BAP	la masse de laitance passée (kg)	la masse de laitance passée (%)
1	0,285	6,33
2	0,029	0,64
3	0,286	6,35



**BAP 1**



**BAP 2**



**BAP 3**

**Figure 3. 3:**Résultat d'essai de stabilité au tamis des BAP.

### 3.3 Essai de la boîte en « L » [NF EN 12 350-10]:

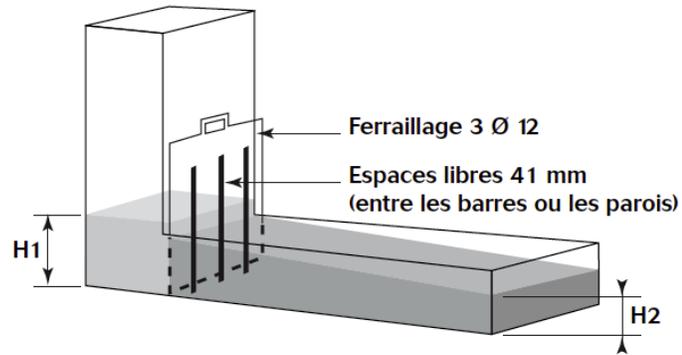
La mobilité du BAP en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée, sont mesurées avec l'essai de la boîte en forme de L.

Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte en forme de L, puis en levant une trappe (séparant les parties verticale et horizontale de la boîte) de laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers des armatures de diamètre 12 mm (ferraillage complexe : 3 barres distantes de 41 mm, ou simple : 2 barres distantes de 59 mm). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticale (H1 côté trappe) et horizontale (H2).

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP. [1]

**Essai de la boîte en L**



**Figure 3. 4:**Essai de la boîte en « L ». [4]

**3.3.1 Résultat d’essai de la boîte en « L »**

**Tableau 8 :** résultat d’essai de la boîte en « l ».

BAP	H1 (cm)	H2 (cm)	H1/H2
1	9	8	0,89
2	8	7	0,75
3	8,75	8	0,91



**BAP1**



**BAP2**



**BAP3**

**Figure 3. 5: Résultat d’essai de la boîte en « L ».**

## 4 Essais de caractérisations du béton auto-plaçant à l'état durci

### 4.1 Essai de compression [NF EN206-1]

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton. L'essai se fait sur une éprouvette cylindrique de dimensions normalisées et d'élancement de 2 ( $H = 2 \varnothing$ ) ou éprouvette cubique 10x10x10.

Nous avons utilisé des cylindres dans cet essai 16x32 cm.



**Figure 3. 6:** Machine de compression.

### Résultat d'essai de compression

**Tableau 9 :** résultat d'essai de compression.

	Résistance 1 (MPa)	Résistance 2 (MPa)	Résistance 3 (MPa)	Résistance moyen (MPa)
BAP 1	31.91	32.43	32.67	32.33
BAP 2	39.61	38.80	41.15	39.85
BAP 3	43.93	44.02	44.28	44.07

### 4.2 Calcul de la porosité et la masse volumique

Le but de l'expérience est de calculer la masse volumique avec l'équation suivante :

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau} \quad (1)$$

Et la porosité avec l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (2)$$

$M_{sec}$  : La masse de l'échantillon sec.

Les échantillons d'essai ont d'abord été séchés dans une étuve à 105°C jusqu'à ce que leur poids se stabilise.

**Tableau 10** : résultat de mesure de  $M_{sec}$ .

	$M_{sec}$ 1 (g)	$M_{sec}$ 2 (g)	$M_{sec}$ 3 (g)	$M_{sec}$ moyen(g)
BAP1	2851	2870	2834	2851,67
BAP2	3088	3076	3031	3065,00
BAP3	2976	2992	2998	2988,67

$M_{air}$  : la masse de l'échantillon humide.

**Tableau 11** : résultat de mesure de  $M_{air}$

	$M_{air}$ 1 (g)	$M_{air}$ 2 (g)	$M_{air}$ 3 (g)	$M_{air}$ moyen (g)
BAP1	2982	2975	2951	2969,33
BAP2	3192	3181	3143	3172,00
BAP3	3103	3112	3109	3108,00

$M_{eau}$  : la masse hydrostatique de l'échantillon.

La masse de l'échantillon sur le Pesée hydrostatique.



**Figure 3. 7: Pesée hydrostatique.**

**Tableau 12 : résultat de mesure de  $M_{\text{eau}}$ .**

	$M_{\text{eau}} 1$ (g)	$M_{\text{eau}} 2$ (g)	$M_{\text{eau}} 3$ (g)	$M_{\text{eau}} \text{moyen}$ (g)
BAP1	1589	1567	1588	1581,33
BAP2	1698	1732	1718	1716,00
BAP3	1723	1728	1730	1727,00

### Résultat de calcul de la masse volumique et la porosité

**Tableau 13 : Résultat de  $\rho$  et  $\varepsilon$ .**

	la masse volumique apparente $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	La porosité $\varepsilon$ (%)
BAP1	2054,03	8,48
BAP2	2105,08	7,35
BAP3	2163,64	8,69

### 4.3 Essai d'indentation

Le principe du test d'indentation consiste à déposer un pénétrateur de forme connue (sphère, cône ou pyramide) sur la surface du matériau à tester. Sous l'action de la charge de choc. Le pénétrateur pénètre dans le matériau et provoque des déformations élastiques et plastiques dans la zone de contact. Après dégageement, une trace résiduelle subsiste.



**Figure 3. 8:**la machine utilisé dans l'essaie d'indentation.

### Résultats d'essai d'indentation



**Figure 3. 10 :** Empreinte obtenue après essai d'indentation.

**A partir de l'équation suivante :**

Nous avons calculé  $kc$  avec relation (3)

$$kc = (P \cdot \beta \cdot \left(\frac{A_0^2}{\delta_0}\right) \cdot (\cot\theta)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{H^3}{E}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

**Tableau 14 :** Les grandeurs de  $E$ ,  $HV$ ,  $a$ , obtenus durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performances BAP 35 .

Po	HV	dm	E	$\beta$	Ao	$\delta_0$	$\Theta$	KC
50	20,05	68	40	16000	0,56	1200	136	0,3
100	20,2	95,6	40	16000	0,56	1200	136	0,36
200	20,6	134	40	16000	0,56	1200	136	0,43
300	18,6	173	40	16000	0,56	1200	136	0,44
500	18,1	226	40	16000	0,56	1200	136	0,49

**Tableau 15 :** Les grandeurs de  $E$ ,  $HV$ ,  $a$ , obtenus durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performances BAP 40.

Po	HV	dm	E	$\beta$	Ao	$\delta_0$	$\Theta$	kc
50	17,2	73,4	40	16000	0,56	1200	136	0,27
100	19,8	96,6	40	16000	0,56	1200	136	0,35
200	18,1	143,2	40	16000	0,56	1200	136	0,39
300	18,3	174,4	40	16000	0,56	1200	136	0,44
500	16,3	225,3	40	16000	0,56	1200	136	0,46

**Tableau 16 :** Les grandeurs de  $E$ ,  $HV$ ,  $a$ , obtenus durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performances BAP 45.

Po	HV	dm	E	$\beta$	Ao	$\delta_0$	$\Theta$	Kc
50	18,6	70,7	40	16000	0,56	1200	136	0,28
100	19,6	97,3	40	16000	0,56	1200	136	0,35
200	17,9	143,8	40	16000	0,56	1200	136	0,39
300	18,6	172,6	40	16000	0,56	1200	136	0,44
500	18,2	225,7	40	16000	0,56	1200	136	0,5

**Conclusion :**

D'après les résultats obtenus précédemment on peut dire qu'effectivement les bétons autoplaçants ont de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques que les bétons vibrés. Mais leur comportement et ténacité est influencé par différents paramètres. Dans cette étude on a vu l'effet de:

- Dosage en superplastifiant.
- La quantité d'eau de gâchage.
- La présence des fumées de silice.
- Le dosage en fumées de silice.

**Références Bibliographiques**

- [1] IDMANE Mohamed << site web <https://www.scribd.com/> >>
- [2] Norme [NF EN 12 350-8]
- [3] Norme [NF EN 12 350-11]
- [4] Norme [NF EN 12 350-10]

---

# Chapitre 05

---

Analyse de résultats

## Chapitre 05 : Analyse de résultats

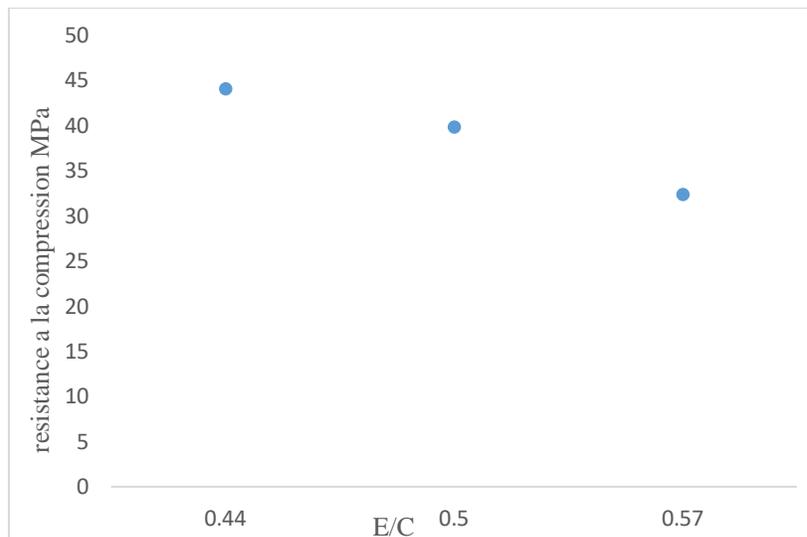
### 1 Introduction

Nous allons tracer des courbes pour tous les résultats précédents (voir le chapitre 04) et essayer de trouver une relation directe entre la ténacité ( $K_c$ ) et la résistance ( $R_c$ ).

### 2 Analyse de résultat

Grâce à des expériences menées sur les BAP Nous avons pu tracer les courbes suivantes entre.

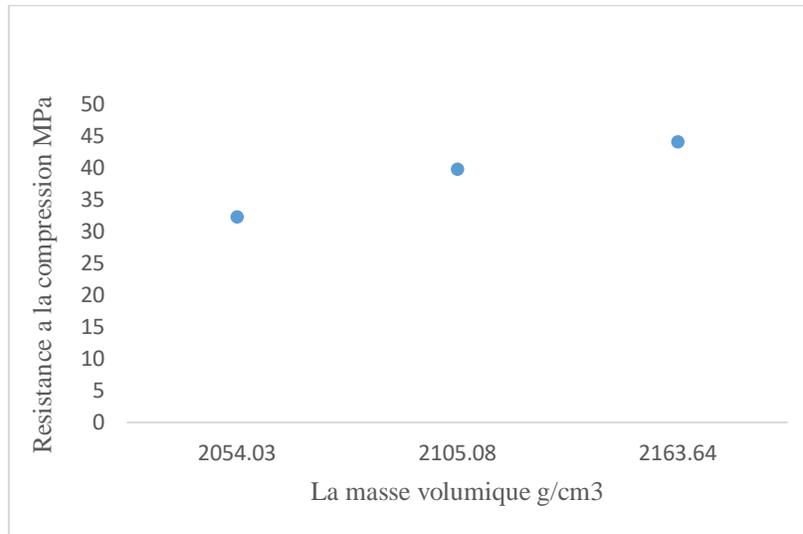
#### 2.1 Résistance des bétons en fonction de E/C



**Figure 4. 1 :** Résistance des bétons en fonction de E/C

Sur la base de cette courbe, on note que lorsque le rapport E/C diminue, la résistance augmente.

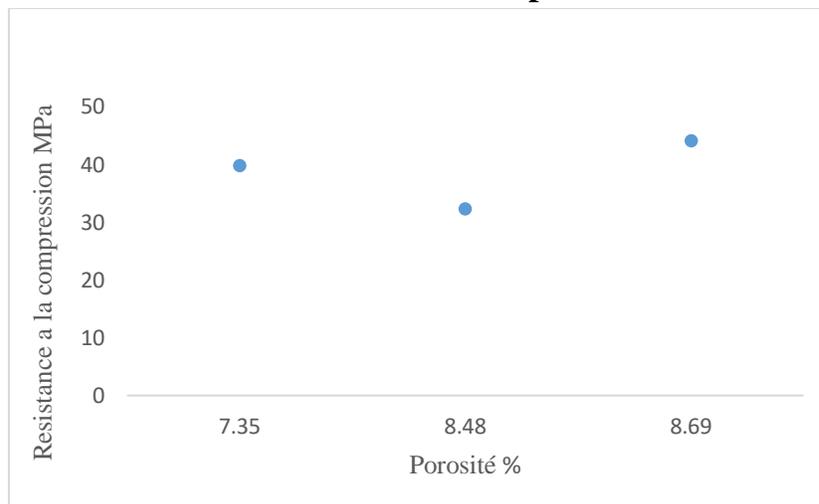
## 2.2 Résistance des bétons en fonction de la masse volumique



**Figure 4. 2 :** Résistance des bétons en fonction de la masse volumique.

Sur la base de cette courbe, on note que lorsque la masse volumique augmente, la résistance augmente. Cette constatation est justifiée par la compacité du matériau.

## 2.3 Résistance des bétons en fonction de la porosité

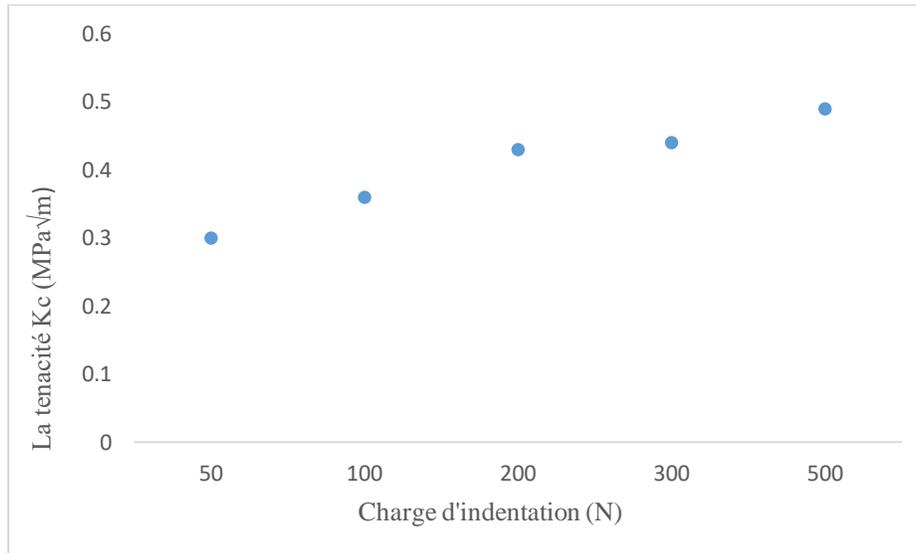


**Figure 4. 3 :** Résistance des bétons en fonction de la porosité.

Sur la base de cette courbe, on note que lorsque la porosité augmente, la résistance augmente avec une perte de résistance dans le BAP 1 à cause du dosage de ciment peu pour les BAP 2 et 3.

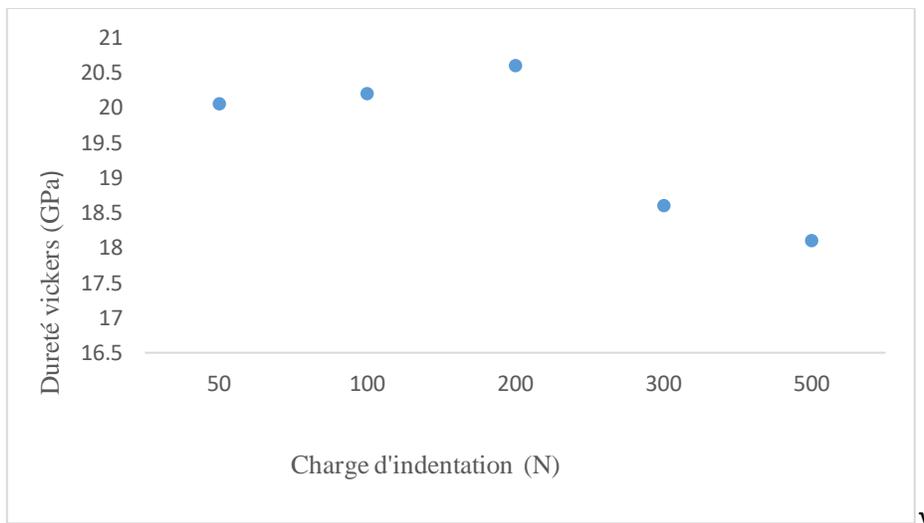
## 2.4 Courbes d'essais d'indentation

### 2.4.1 Variation de la ténacité $K_c$ en fonction de la charge appliquée $P$ (BAP35)



**Figure 4. 4 :** Variation de la ténacité  $K_c$  en fonction de la charge appliquée  $P$  (BAP 35).

### 2.4.2 Variation de la dureté en fonction de la charge $P$ (BAP 35)



**Figure 4. 5 :** Variation de la dureté en fonction de la charge  $P$  (BAP 35).

### 2.4.3 Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P(BAP35)

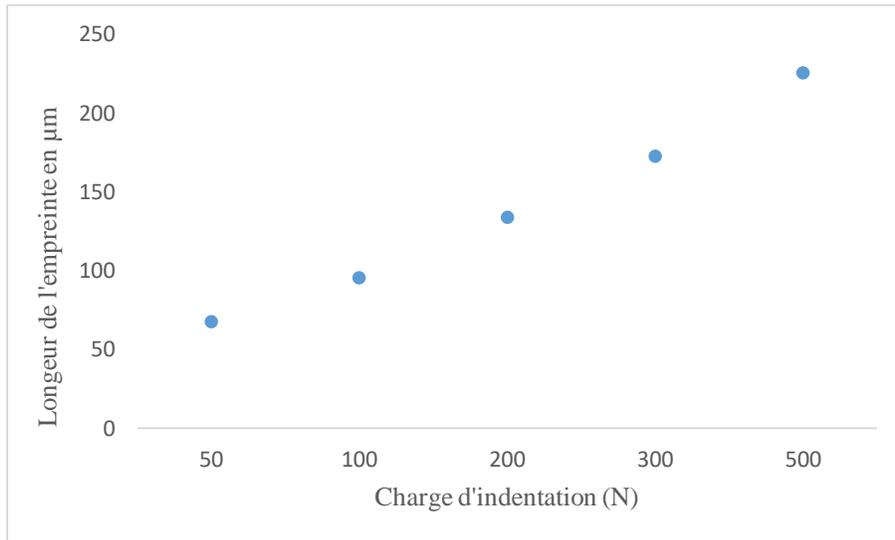


Figure 4. 6 :Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P(BAP35).

### 2.4.4 Variation de la ténacité $K_{IC}$ en fonction de la charge appliquée P (BAP40)

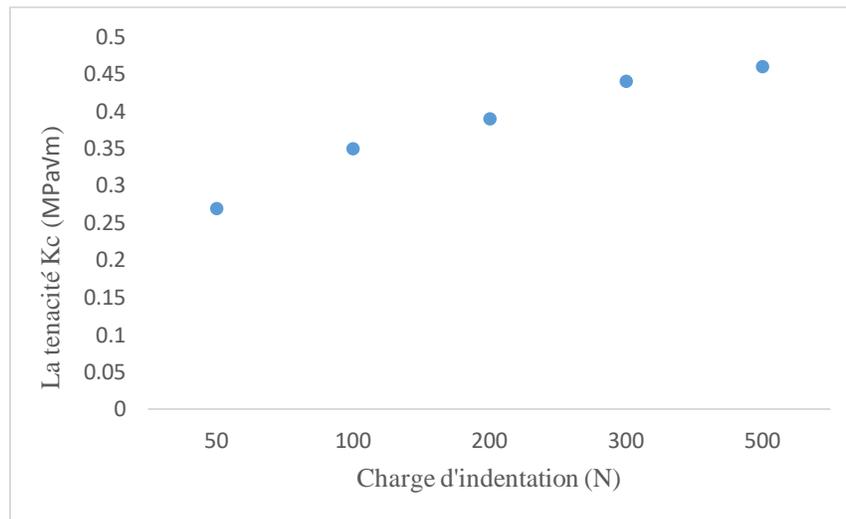
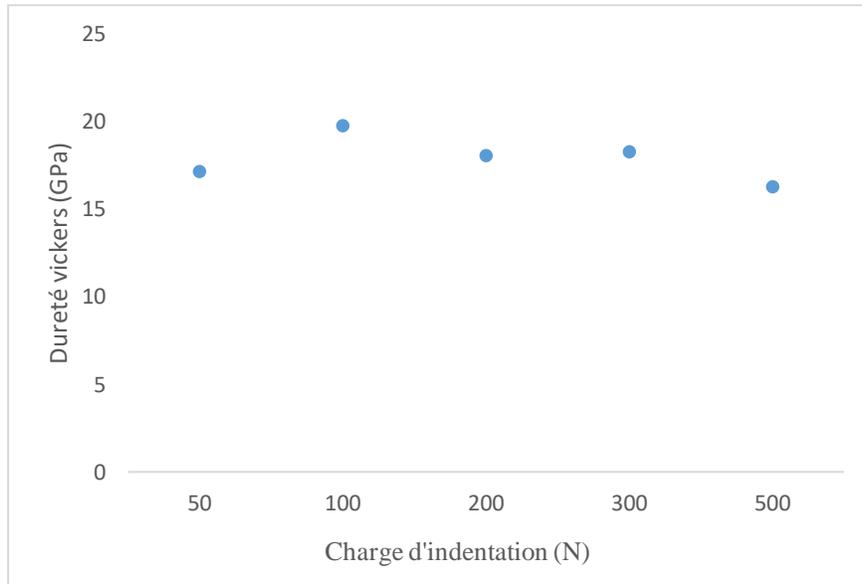


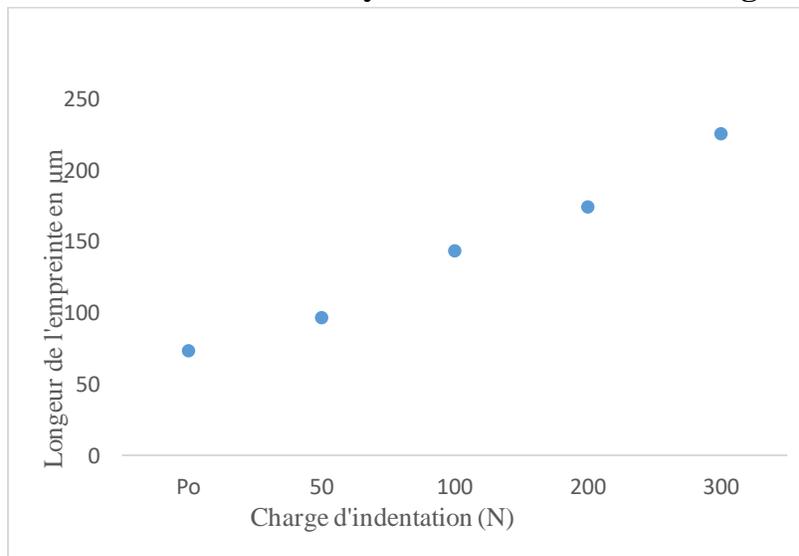
Figure 4. 7 :Variation de la ténacité  $K_{IC}$  en fonction de la charge appliquée P (BAP40).

### 2.4.5 Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 40)



**Figure 4. 8 :** Variation de la dureté en fonction de la charge P (BAP 40).

### 2.4.6 Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP40)



**Figure 4. 9 :** Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP40).

### 2.4.7 Variation de la ténacité $K_{Ic}$ en fonction de la charge appliquée $P$ (BAP45)

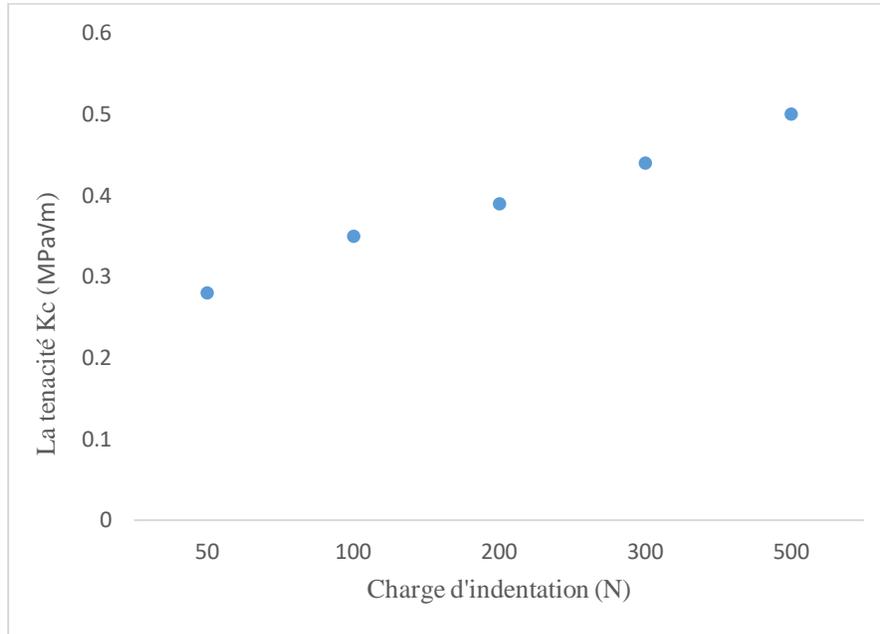


Figure 4. 10 : Variation de la ténacité  $K_{Ic}$  en fonction de la charge appliquée  $P$  (BAP45).

### 2.4.8 Variation de la dureté en fonction de la charge $P$ (BAP 45)

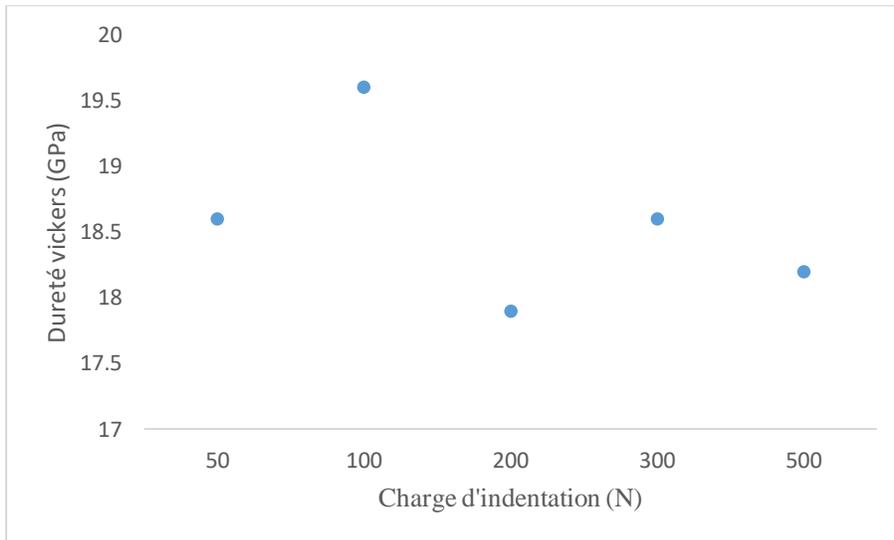
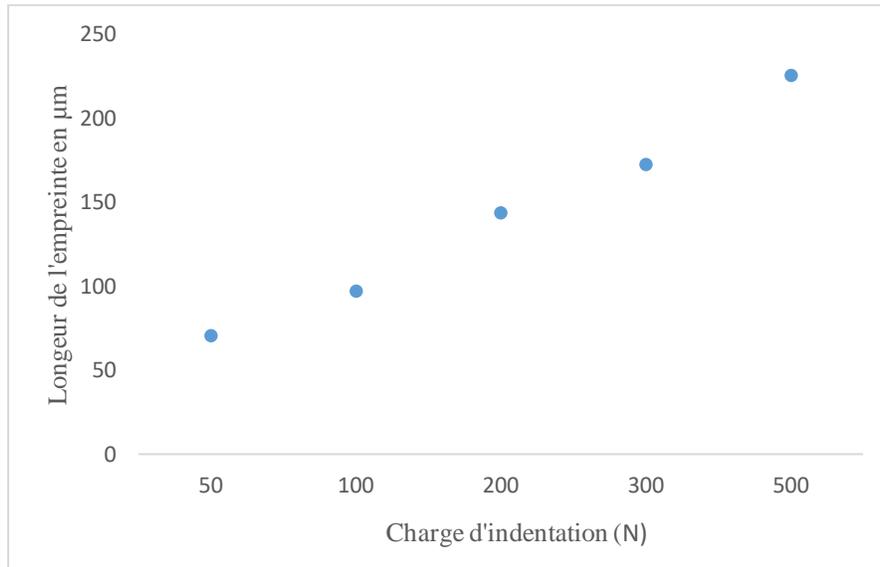


Figure 4. 11 : Variation de la dureté en fonction de la charge  $P$  (BAP 45).

#### 2.4.9 Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP45)

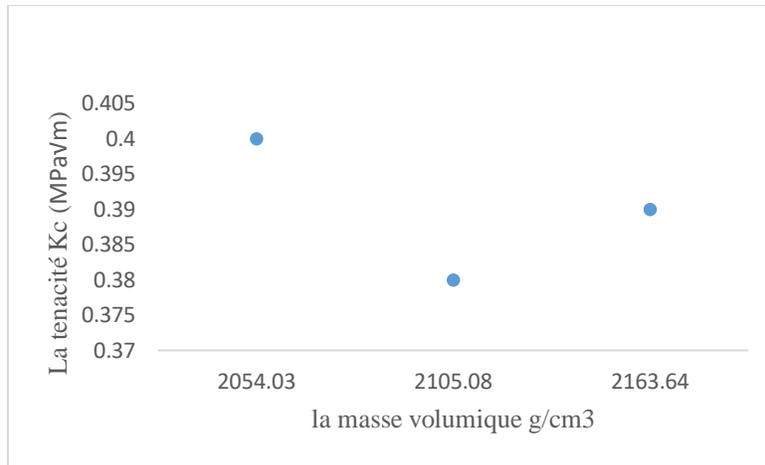


**Figure 4. 12 :** Variation du diamètre moyenne en fonction de charge P (BAP45).

Grâce au courbe tracé par les résultats d'indentation on remarque :

- On note que lorsque la ténacité augmentée, on a une augmentation de la charge P.
- On note que lorsque le diamètre moyenne augmente, on aura une augmentation de la charge P.
- La dureté diminue progressivement après l'arrivée à un seuil de 100 N.

#### 2.4.10 Variation du la ténacité en fonction du la masse volumique



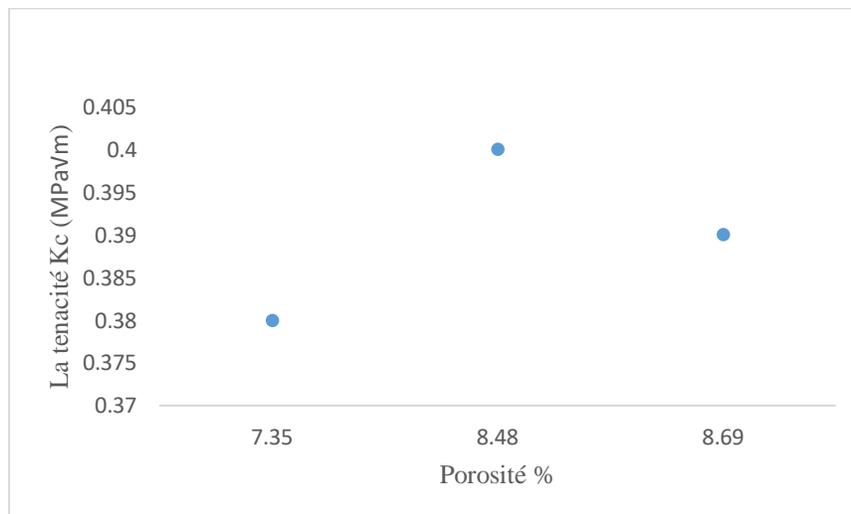
**Figure 4. 13 :** Variation du la ténacité en fonction du la masse volumique.

On constate à travers la courbe 4.13 que la ténacité du matériau est entre 0,37 à 0,40 pour un intervalle de variation de la masse volumique de 2054 g/cm<sup>3</sup> à 2164 g/cm<sup>3</sup>. Pour connaître la corrélation exacte il faut augmenter la surface de nuage des points à tester.

A ce stade on peut proposer la relation suivante :

$$Kc = -0,005\rho + 0,4 \quad (1)$$

#### 2.4.11 Variation du la ténacité en fonction du la porosité



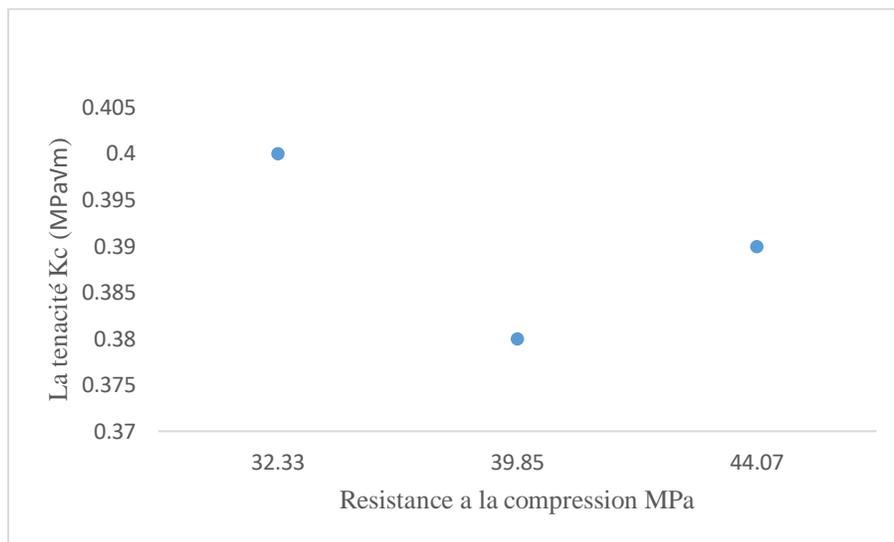
**Figure 4. 14 :** Variation du la ténacité en fonction du la porosité.

Par manque de points à tester, la relation liant la porosité à la ténacité (courbe 4.14) n'a pas donner une justesse de la corrélation.

Cette variation peut être représentée par la relation suivante :

$$K_c = 0,005 \varepsilon + 0,38 \quad (2)$$

#### 2.4.12 Variation du la ténacité en fonction du la résistance à la compression :



**Figure 4. 15 :** Variation du la ténacité en fonction du la résistance à la compression.

Le modèle proposé dans la figure 4.15 ne justifie pas la corrélation exacte entre la résistance à la compression déduite de l'essai d'écrasement et la ténacité déduite des essais d'indentation, à travers notre expérience on recommande de multiplier le nombre de points afin de cibler le modèle d'interaction plus réaliste entre les deux paramètres.

A ce stade on propose la relation suivante :

$$K_c = -0,005R_c + 0,4 \quad (3)$$

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a essayé de connaître toutes les interactions entre les différents paramètres rentrant dans la caractérisation des BAP par essai classiques et essais d'indentation.

On a remarqué à travers les trois classes des BAP que les modèles proposés peuvent être améliorés facilement en augmentant le nombre de points à tester, Néanmoins à ce stade, le comportement mécanique à travers les paramètres d'indentation a été calibré ici par la proposition de plusieurs formules de corrélation. Ces formules peuvent être considérées comme une vraie base de données pour des études complémentaires.

# Conclusion générale

Le béton autoplaçant est un béton compacté par gravité sans apport d'énergie de compactage.

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont : sa capacité à traverser des espaces restreints, le BAP a une excellente capacité à remplir les moindres recoins du coffrage avec du béton homogène.

La durabilité des bétons autoplaçants est un sujet d'actualité, il s'intéresse à la caractérisation des indicateurs qui peuvent influencer directement sur la structure poreuse du BAP. La porosité est un paramètre clé dans ce contexte.

La technique de l'indentation est utilisée pour évaluer la résistance aux chocs avec différentes méthodes basées sur la mesure de la longueur des fissures en fonction des contraintes appliquées au matériau. Ce dernier peut être modifié en remplaçant le rapport module d'élasticité sur dureté par le rapport énergie de déformation élastique sur énergie totale.

A travers les différents cas de notre étude sur les BAP on a proposé plusieurs formules et modèles de corrélation, ces formules peuvent être considérées comme étant une vraie base de données pour les prochaines études complémentaires. Les travaux sont à poursuivre pour développer des modèles à étendue plus large, dans ce sujet on propose d'élargir la gamme des familles de BAP à étudier et d'augmenter le nombre de points à tester.

Les essais d'indentation sont des techniques de mesure fiables pour la caractérisation des bétons en général, et pour les BAP en particulier, il est donc intéressant de poursuivre ce chemin, et de trouver le lien exact entre l'indentation et la durabilité de ces matériaux sur la base d'une caractérisation plus réaliste de la porosité.