

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE 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

- BOUDJEMLINE CHAABANE
- BELHOUCHET YOUCEF

Intitulé

Thème

Corrélation des performances mécaniques des bétons étude comparative par les essais d'indentation sur les bétons : ordinaire, BAP, et BHP.

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. LOGZIT Nacer.</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BENTOUMI Mohamed.</i>	<i>MCB</i>	<i>Co_Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>P.Bechiche said</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Pr.Messaoudene ibrahimi</i>	<i>MAA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.deboucha sadek</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Merci tout d'abord à Dieu, Tout puissant qui m'a donné la santé et *la volonté* pour entreprendre ce modeste travail.

Nous remercions, nos encadreurs **Mr. BENTOUMI Mohamed**, et **Mr. LOGZIT Nacer** pour l'orientation, la confiance et la patience tout long de ce travail.

Nous tenons à remercier spécialement ; nos familles ; nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. Un grand merci également à nos sœurs et frères pour leurs encouragements.

En fin, nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire.

Dédicace

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :
A mes chers parents. A mes frères et mes sœurs
A toute ma famille. A 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.

Chaabane

Résumé :

Les propriétés mécaniques du béton sont déterminées par des expériences conventionnelles pendant plusieurs années à l'aide d'essais standards qui parfois donne des résultats qui ne tiennent pas compte des conditions réelles d'utilisation du béton, notamment dans le domaine industriel. Actuellement nous utilisons des méthodes plus simples pour simuler le comportement mécanique des matériaux dans des situations plus réalistes, tel que l'essai d'indentation.

En fait, l'indentation automatisée est largement utilisée pour la caractérisation des propriétés mécaniques des différents matériaux à savoir : matériaux métalliques et non métalliques, béton, matériaux peints, composites, vitrocéramique, bois, etc.

Dans cette étude, nous comparerons les résultats obtenus par les essais standard du béton pour la caractérisation mécanique du béton avec ceux obtenus par l'essai d'indentation.

Les essais ont été réalisés sur trois types de béton : (Béton ordinaire 30, BAP 35 et Béton Haute Performance).

Mots clés : béton, caractérisation mécanique du béton, propriétés mécaniques du béton, essai d'indentation, Béton autoplaçant. Béton haute performance.

Abstract:

The mechanical properties of concrete are determined by conventional experiments over several years using standard tests which sometimes give results which do not take into account the actual conditions of use of concrete, particularly in the industrial field. Currently we use simpler methods to simulate the mechanical behavior of materials in more realistic situations, such as the indentation test.

In fact, automated indentation is widely used for the characterization of mechanical properties of different materials, namely: metallic and non-metallic materials, concrete, painted materials, composites, glass-ceramics, wood, etc.

In this study, we will compare the results obtained by standard concrete tests for the mechanical characterization of concrete with those obtained by the indentation test.

The tests were carried out on three types of concrete: (Ordinary concrete 30, BAP 35 and High Performance Concrete).

Keywords: concrete, mechanical characterization of concrete, mechanical properties of concrete, indentation test, self-compacting concrete. High performance concrete.

ملخص

يتم تحديد الخواص الميكانيكية للخرسانة من خلال تجارب تقليدية على مدى عدة سنوات باستخدام اختبارات قياسية تعطي أحياناً نتائج لا تأخذ في الاعتبار الظروف الفعلية لاستخدام الخرسانة ، خاصة في المجال الصناعي. نستخدم حالياً طرقاً أبسط لمحاكاة السلوك الميكانيكي للمواد في مواقف أكثر واقعية ، مثل اختبار المسافة البادئة. في الواقع ، يتم استخدام المسافة البادئة الآلية على نطاق واسع لتوصيف الخواص الميكانيكية للمواد المختلفة ، وهي: المواد المعدنية وغير المعدنية ، والخرسانة ، والمواد المطلية ، والمركبات ، والسيراميك الزجاجي ، والخشب ، إلخ.

في هذه الدراسة، سنقارن النتائج التي تم الحصول عليها من خلال اختبارات الخرسانة القياسية للتوصيف الميكانيكي للخرسانة مع تلك التي تم الحصول عليها من خلال اختبار المسافة البادئة.

تمت الاختبارات على ثلاثة أنواع من الخرسانة: (الخرسانة العادية 30، الخرسانة المصبوبة ذاتياً BAP 35 و الخرسانة عالية الأداء **الكلمات المفتاحية** : الخرسانة ، التوصيف الميكانيكي للخرسانة الخواص الميكانيكية للخرسانة ، اختبار المسافة البادئة ، الخرسانة ذاتية الصب الخرسانة عالية الأداء.

Sommaire

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I:RECHERCHEBIBLIOGRAPHIQUE	
1. INTRODUCTION	4
1.1 Le béton :	4
1.2 Histoire du béton :.....	4
1.3 Domaines d'Application Du Béton.....	5
1.4 CLASSES DE BÉTONS :	5
1.5 Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du Béton	5
a. Les avantages de béton :	5
b. Les inconvénients de béton :	5
2. BETON ORDINAIRE (BO)	6
2.1 La composition du béton ordinaire	6
a. Le ciment	6
b. Les granulats.....	6
c. Rapport ciment-eau	7
d. Rapport granulat-sable	7
2.2 Formulation du béton ordinaire :	7
3. BETON AUTO PLAÇANT (BAP)	8
3.1 Définition du béton Auto plaçant.....	8
3.2 Domaine d'utilisation des BAP	9
3.3 Avantages et inconvénients des BAP.....	9
a. Les avantages :.....	9
b. Inconvénients de BAP :	9
4. BETON A HAUTE PERFORMANCE (BHP) :	10
4.1 Spécifications sur les constituants du béton à haute performance.....	10
Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes. ..	10
4.2 Additions.....	10

4.3 Adjuvants	10
4.4 Formulation du béton à haute performance	10
4.5 Utilisations du BHP	11
4.6 Avantages et inconvénients des BHP	11
a. Avantages	11
b. Inconvénients.....	11
4.7 Les additions minérales.....	12
4.8 Les adjuvants	12
5. L'INDENTATION DES MATERIAUX :.....	12
5.1 Principe de l'essai d'indentation :	13
5.2 Différents types d'indenteur	13
CHAPITRE II: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES	
1. INTRODUCTION :	17
2. LES MATERIAUXUTILISÉS	17
3. ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX	18
4. FORMULATION DU BETON ORDINAIRE :	19
4.1 Matériaux utilise	19
a. Le ciment	19
b. L'eau de gâchage.....	19
c. Le sable.....	20
d. Le gravier :	20
e. Additions minérales	20
f. Les adjuvants	20
4.2 LES FORMUILES DES CALCULS :	20
Résistance estimée du béton à 28 Jours :	20
4.3 Résultats :	21
5. Formulation des BAP 30.....	23
5.1Caractérisation des BAP à l'état frais	26

5.1.1 Essai d'étalement :.....	26
5.1.2 Essai de la boîte en L (L-box test)	27
5.1.3 Essai de stabilité au tamis	28
6. FORMULATION PRATIQUE D'UN BHP	29
6.1 Résultats :.....	30
6.2 Caractérisation des BHP à l'état frais	31
6.2.1 Essais au cône d'Abrams	31
6.2.2 Essai de la masse volumique.....	32
7. LES ESSAIS MECANIQUES	32
7.1 Essai de compression :	32
8. PARTIE PRATIQUE AU LABORATOIRE :.....	33
8.1 Formulation des bétons d'étude	33
8.2 Étapes de confection du béton	33
8.3 Préparation des mélanges.....	34
a. Malaxage (NF EN 206-1)	34
b. Mise en place du béton dans les moules	35
c. Le découpage des éprouvettes :.....	35
d. Rodage et polissage	36
9. Conclusion :	37

CHAPITRE III: L'INDENTATION DU BETON ET ETUDE DE CORRELATION

1. INTRODUCTION.....	39
2. L'ESSAI DE L'INDENTATION	39
2.1 Principe de l'essai	39
3. Indentation conventionnelle:.....	40
3.1 Dureté Brinell :	40
3.2 Dureté Vickers	41
3.3 Dureté Rockwell	42
3.4 Dureté Knoop.....	43

4. Indentation instrumentée.....	44
4.1 Définition	44
4.2 Technique et analyse.....	44
5. Caractérisation par indentation	46
6. Matériaux et méthodes	47
6.1 Matériaux utilisés.....	47
6.2 Technique d'indentation	48
6.2.1 Moyens utilisés.....	48
7. ETUDE DE CORRELATION	51
7.1 Introduction :.....	51
7.2 Modèles de corrélation :.....	51
7.3 Exposé des résultats numériques de l'équipe de recherche :	54
7.4 Corrélation et étude comparative :	56
7.5 Interprétation des résultats :	58
CONCLUSION:.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:	61

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE BETON AUTOPLAÇANT

Figure 1.1: Béton ordinaire :.....	06
Figure 1.2 : Le béton auto plaçant :	08
Figure 1.3: le béton à haute performance	11
Figure 1.4 : Schéma de l'essai d'indentation.....	12
Figure 1.5: Schéma de différents types de pointe et d'empreintes correspondantes	13

CHAPITRE II CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure 2.1 : Un gravier G8/15.....	18
Figure 2.2 : Un gravier G3/8	18
Figure 2.3 : SABLE BOU SAADA.....	18
Figure 2.4 : CIMENT.....	18
Figure 2.5: Tamis d'analyse granulométrique.....	18
Figure 2.6:TAMISSEUSE.....	18
Figure 2.7. essai d'étalment.	26
Figure 2.8: la boîte en L.....	28
Figure 2.9 :Essai de stabilité au tamis.....	28
Figure 2.10:Dosage en super plastifiant (%)......	29
Figure 2.11: Dosage en ciment (Kg/m ³)	29
Figure 2.12 : Affaissement au cône d'Abrams.....	31
Figure 2.13 :schéma démonstratif de l'essai de compression.....	32
Figure 2.14 :le modèle réglementaire	33
Figure 2.15 : Moule cubique 16*32 cm ³	33
Figure 2.16: malaxage des matériaux au niveau de laboratoire.....	34
Figure 2.17: la mise en place du béton.....	35
Figure 2.18 : Le découpage des éprouvettes du béton.....	36
Figure 2.19 :Rodage et polissage du matériau Bo BAP BHP.....	37

CHAPITRE III : L'INDENTATION DU BETON ET ETUDE DE CORRELATION

Figure3. 1 : Schéma de l'essai d'indentation :.....	39
Figure3. 2 :Schema du Principe de la dureté Brinell :.....	40
Figure3. 3 : Schéma du principe de la dureté Vickers :.....	41
Figure 3.4 : Schéma du principe de la dureté Rockwell HRC :.....	42
Figure 3.5 : Schéma du principe de la dureté Knoop HK :.....	43
Figure 3.6 : Description d'un essai d'indentation à une vitesse constante. :	45
Figure 3.7 : Représentation schématique des systèmes de fissures induits par indentation Vickers :.	46
Figure3. 8 : Machine d'indentation Zwick ZHU 2.5 :	48
Figure 3.9 : Les éléments constructifs de la tête (poinçon) mesurant la dureté Zwick ZHU 2,5KN :.	48
Figure 3.10 : Illustration de la séquence d'indentation pour le test de dureté Martens :.....	49
Figure 3.11 : Plusieurs essais effectués sur le béton BAP au moyen d'indentation Zwick ZHU 2.5 :	49
Figure 3.12 : Relation entre le Module E et le volume de l'air dans le béton BHP Corrélation par test d'indentation :.	52
Figure 3.13 : Module d'élasticité et micro dureté de l'ITZ et de la matrice pour le béton coulé dans l'air et dans l'eau	52
Figure 3.14 : Relation entre la résistance du béton à la compression et le module E déterminé par indentation.....	56
Figure 3. 15 : Influence de la charge P d'indentation sur le module E.	57

Liste des tableaux

Liste des tableaux :

**CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES
EXPERIMENTALES**

Tableau 1 : Relation entre consistance cible, demande en eau et teneur en air :	21
Tableau 2 : Valeurs estimées de f_c 28jours :	21
Tableau 3 : Valeurs estimées de K :	22
Tableau 4 : Les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :	22
Tableau 5 : Les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32 :	23
Tableau 6 : Les constituants du béton pour 03 éprouvettes 16/32 + 20% des constituants :	23
Tableau 7 : les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :	24
Tableau 8 : les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32 :	25
Tableau 9 : Les constituants du béton pour 03 éprouvette 16/32+ 20% des constituants :	25
Tableau 10 : Dosage en gros granulats :	29
Tableau 11 :les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :	30
Tableau 12 :les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32 :	30
Tableau 13 :les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32 + 20% des constituants.....	32
Tableau 14 : Etapes de polissage du Béton BAP :	37

Chapitre III : L'INDENTATION DU BETON

Tableau 3.1 Résistance à la compression des différents bétons :	50
Tableau 3.2. Paramètres de fractures :	51
Tableau 3.3. Comparaison des résultats de la ténacité (K_{IC}) avec la littérature :	52
Tableau 3.4. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton ordinaire [31] :	53
Tableau 3.5. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton autoplacant [31] :	54
Tableau 3.6. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton autoplacant BAP 25 [32] :	54
Tableau 3.7. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performance [31] :	55
Tableau 3.8. Relation entre la résistance à la compression et le module E. :	55
Tableau 3.9. Module d'élasticité des bétons testés n fonction de la charge d'indentation P :	56

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le matériau le plus utilisé dans la construction des différents ouvrages est le béton. Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier son utilisation. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons auto-plaçant (BAP), bétons à hautes performances (BHP) et bétons ordinaires (BO).

La caractérisation mécanique du Béton s'est limitée pendant plusieurs années aux essais standards, qui présentent par fois un travail fastidieux, et dans d'autres cas une caractérisation qui ne tient pas compte des conditions réelles d'utilisation du béton, surtout dans le domaine industriel. On assiste actuellement à l'utilisation des moyens plus significatifs pour simuler le comportement mécanique des matériaux à des situations plus réalistes.

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 dépend de l'état de surface, donc de la méthode de préparation. Pour pouvoir visualiser précisément la qualité d'image du (BO BAP BHP) après chaque test d'indentation, la forme du béton doit être plate et convenablement poli.

Notre premier objectif est de préparer des échantillons pour BO, BHP, BAP. Précisément et après 28 jours nous procéderons aux essais de caractérisation par les essais mécaniques standards, ensuite, expérimentation par l'indentation.

Ce travail a pour but de développer notre compréhension sur les trois types de béton les plus utilisés, et étude des différents tests mécaniques réalisés sur ces derniers. Plusieurs tests sont adoptés, parmi lesquelles on a utilisé l'essai d'indentation.

Ainsi, ce travail a été subdivisé en trois chapitres :

Chapitre I : synthèse bibliographique, ce chapitre présente une étude bibliographique sur les bétons et en particuliers (BO, BHP, BAP).

Le chapitre 2 est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés et méthode des expérimentales, ce chapitre présente une synthèse des travaux réalisés sur la formulation des

différents bétons et aussi sur la caractérisation des matériaux utilisés. Puis, dans le dernier chapitre pratique on vise une comparaison des résultats des propriétés du béton entre les essais standards et l'essai d'indentation.

Chapitre I :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimés son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers. Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration...Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers [1]

1.1 Le béton :

Est une roche artificielle, composite fabriqué à partir de mélange de granulats gros (graviers) et fins (sables), Ils constituent le squelette du béton liés entre eux par un liant. Le liant peut être « hydraulique » ce liant est appelé « Ciment » formé une pâte de ciment (ciment + eau). La pâte de ciment, élément actif du béton enrobe les granulats et joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci [02].

1.2 Histoire du béton :

Les Romains de l'Antiquité savaient faire du béton. Ils avaient découvert que, pour fabriquer un liant hydraulique qui fasse prise sous l'eau, il fallait mélanger à de la chaux des déchets de fabrication des tuiles et des briques ou des cendres volcaniques (provenant notamment de Pozzuoli, dans la baie de Naples, qui donna son nom à la pouzzolane, roche volcanique). Cette connaissance leur a, par exemple, permis de construire des ports protégés par des jetées en béton qui faisait prise sous l'eau, contrairement à la chaux (Vitruve, De l'architecture).

Leur savoir s'est ensuite perdu au Moyen Âge. C'est la mise au point et le développement de la production des ciments artificiels modernes qui a permis l'essor de la construction actuelle en béton. Aux barques en béton (1848) de Joseph-Louis Lambot (1814-1887) et aux caisses à fleurs (1849) de Joseph Monier (1823-1906) succèdent les réalisations d'entrepreneurs qui développent des « systèmes » de béton armé : François Coignet (1814-1888), qui met au point le béton aggloméré ; Monier, dont les brevets de 1877 et 1878 seront exploités en Allemagne ; François Hennebique (1842-1921), dont la société construira plus de 7 000 ouvrages, parmi lesquels le siège de cette dernière au 1, rue Danton (1900) à Paris et la villa de l'architecte à Bourg-la-Reine(1903) sont des exemples encore existants ; Armand Considère (1841-1914),

qui invente le béton fretté (1901)... En 1906, cette première phase prend fin avec la publication des Instructions relatives à l'emploi du béton armé, véritable premier règlement français de calcul des structures en béton armé. Au xxe siècle, c'est l'invention du béton précontraint par Eugène Freyssinet (1879-1962) qui ouvrira de nouveaux horizons au matériau béton. La précontrainte, qui consiste à garder le béton dans un état comprimé grâce à des câbles en acier tendus, permet d'atteindre de grandes portées avec du béton et a trouvé, notamment, son application dans les ponts. Depuis lors, les progrès dans les sciences des matériaux ont permis d'améliorer encore de manière spectaculaire les propriétés des bétons.[02]

1.3 Domaines d'Application Du Béton

Le béton ce trouve généralement armé ou non, précontraint, désigné en abrégé par les lettres NA (non armé), BA (béton armé) ou BP (béton précontraint). Le béton comme matériau de construction est actuellement utilisé dans divers domaines d'application et avec divers procédés tels que : les bâtiments, travaux publics, les ponts, les tunnels, les routes rigide,... [02].

1.4 Classes De Betons :

Les BHP sont souvent classés selon leur résistance caractéristique à la compression à 28 jours f_{c28} en MPa . C'est ainsi que les spécialistes distinguent :

- Bétons ordinaire 20 à 50 MPA
- Bétons à hautes performances 50 à 100 MPA.
- Bétons à très hautes performances 100 à 150 MPA.
- Bétons exceptionnels ≥ 150 MPA.

1.5 Les Avantages et les Inconvénients de l'Emploi du Béton

a. Les avantages de béton :

- Se moule, épouse toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.
- Peu couteux, facile à fabriquer, peu d'entretien.
- Devient solide comme de la pierre.
- Résiste bien au feu et aux actions mécaniques habituelles.
- Associé à l'acier, il offre des possibilités de constructions très vastes.

b. Les inconvénients de béton :

- Faible résistance à la traction.
- Faible isolation thermique.
- Coffrages nécessaires pour sa mise en œuvre.

- Sa destruction entraîne un cout élevé (en cas de démolition) et n'est pas ou peu recyclable. [04]

2. Béton Ordinaire (Bo)

Le béton ordinaire est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2 500 Kg/m³. Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints. Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage.



Figure 1: Béton ordinaire.

2.1 La composition du béton ordinaire

a. Le ciment

Pour un béton ordinaire, nous pouvons utiliser des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C ou CEM V. Le choix et le dosage déterminent la résistance du béton ainsi que ces différentes propriétés.

b. Les granulats

Une bonne partie de la résistance du béton est tirée des granulats, principalement des gros granulats, d'où l'importance de l'emploi des granulats ayant des dimensions

maximales et de bonnes qualités. Plus les grains seront fins, plus le dosage du ciment devra être élevé.

c. Rapport ciment-eau

L'eau doit être propre dans le but d'éviter au maximum les impuretés telles que les matières organiques ou les alcalis pouvant entraîner la corrosion du béton armé en cas d'utilisation d'armatures. La quantité d'eau est en général comprise entre 140 et 200 litres/m³. On estime que 50% de l'eau de gâchage servira à l'hydratation du ciment et les 50% restant contribuera à la plasticité du béton, nécessaire pour sa mise en œuvre.

d. Rapport granulats-sable

Le rapport granulats-sable doit être inférieur à 2. En effet, si le rapport est supérieur à 2,2, la résistance en compression ainsi que la densité augmenteront considérablement. Par contre, cela rendra l'ouvrabilité ou la maniabilité du béton moindre.

2.2 Formulation du béton ordinaire :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- la méthode de Baron
- la méthode de Bolomey.
- la méthode de Féret.
- la méthode de Faury
- la méthode de Dreux-Gorisse.

3. Béton Auto Plaçant (Bap)



Figure 2 : Le béton auto plaçant.

3.1 Définition du béton Auto plaçant

Les bétons auto plaçant (BAP, ou SCC, en anglais, self compacting concrete) ; Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferrailés. Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les critères caractérisant un béton auto plaçant sont : 1- les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixés dans la fourchette 55 cm à 85 cm (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréole de laitance ou amoncellement de gros granulats au centre). 2- le taux de passage à la boîte en L doit être supérieur à 0,8. 3- Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée. L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante.

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. [5]

3.2 Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, surtout les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [6]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.). Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation des structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- 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.

3.3 Avantages et inconvénients des BAP

a. Les avantages : Les bétons Autobloquants BAP présentent de nombreux avantages, on cite :

Avantages techniques :

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

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.

Avantages écologiques:

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP)

b. Inconvénients de BAP :

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et

l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants.

4. Béton a haute performance (bhp) :

Est un béton caractérisé par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci est supérieure à 50 MPA à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme , un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.[08]

Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmes réduite, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc. [09.10]

4.1 Spécifications sur les constituants du béton à haute performance

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

Ciments : conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillée 42,5 ou 52,5 (N ou R).

Granulats : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).

4.2 Additions: conformes aux diverses normes en vigueur – cendres volantes silico alumineuses, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).

4.3 Adjuvants: plastifiants réducteur d'eau et super plastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

4.4 Formulation du béton à haute performance

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores

capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. Des outils spécifiques de contrôle ont été développés pour faciliter la formulation des BHP:

- méthode des coulis AFREM,
- méthode MBE (Mortier de Béton Équivalent),
- logiciel IBETONLAB.

4.5 Utilisations Du BHP

Le béton haute performance est utilisé pour les ouvrages nécessitant une résistance élevée : les travaux souterrains et les tunnels, les parkings, les ouvrages d'art, les travaux en milieu marin, les éléments préfabriqués, les ouvrages exceptionnels tels que les centrales nucléaires ou les ponts.



Figure 3: le béton à haute performance.

4.6 Avantages et inconvénients des BHP

a. Avantages

- Il est très résistant et peut donc être utilisé pour des constructions solides
- Il n'est pas sensible au cycle de gel et dégel et se fissure donc plus difficilement
- Il est facile à mettre en place
- C'est un matériau très durable

b. Inconvénients

- Il n'est pas très utile pour les petits travaux
- Il coûte plus cher qu'un béton classique

Il est composé de substances chimiques qui sont moins écologiques

4.7 Les additions minérales

- Les fillers calcaires
- Les fumées de silice
- Cendres volantes
- Les méta kaolins

4.8 Les adjuvants

- Les plastifiants réducteurs
- d'eau et les super plastifiants
- Les accélérateurs de prise
- Les retardateurs de prise

5. L'indentation Des Matériaux :

L'indentation est une technique de mesure de propriétés mécanique des matériaux. Si la force et la pénétration ne sont pas enregistrées au cours de l'essai, elle ne permet que de mesurer la dureté d'un matériau. Si elles sont enregistrées et contrôlées, on parle d'indentation instrumentée.[11]

L'indentation est un outil ancien, qui est mentionné par Huygens dans son Traité de la lumière. L'intérêt pour cette propriété est allé grandissant que ce soit pour protéger les objets des rayures ou au contraire pour les polir.

A partir des années 80, l'indentation instrumentée apparaît et conduit à l'essor de ces techniques de caractérisation mécanique des surfaces. De nombreux conférences et numéros spéciaux de revue sont consacrés à ce sujet [12]. L'indentation instrumentée est utilisée pour caractériser et d'analyser les propriétés mécaniques des surfaces de divers matériaux telles que : la dureté H, le module d'Young E et/ou encore la résistance à la fissuration.

Généralement, cette technique permet d'estimer la ténacité, **KIC**, de matériaux fragiles. Chaque méthode utilise des formules résultant d'une corrélation empirique entre la force à rupture, ou la dimension des fissures produites par l'indentation, et des essais effectués en mécanique de la rupture classique. Il s'en suit une dispersion importante des incertitudes de mesure, celles-ci pouvant aller jusqu'à 50 % [13].

En plus, Elle peut être appliquée à l'étude du comportement et des systèmes de fissurations sur

les matériaux fragiles et métalliques durant l'indentation cyclique [14,15]. Almquist [16] a, dans son étude sur le carbure de tungstène, tenté une corrélation empirique entre l'énergie nécessaire à créer les fissures et la ténacité. Lawn **et al.** [17,18] mettent en évidence une corrélation entre la taille des fissures formées par indentation et la ténacité mesurée par les techniques classiques de la mécanique. Evans **et al.** [19] montrent l'influence des contraintes résiduelles qui peuvent être estimées par l'essai d'indentation [20,21].

Les essais d'indentations instrumentés mettent en évidence des instabilités, appelés pop-in sur les courbes de chargement, instabilités qui correspondent à la formation des fissures et qui peuvent être reliés à la ténacité du matériau [22]

5.1 Principe de l'essai d'indentation :

Le principe de l'essai d'indentation consiste à appliquer une charge sur un indenteur de forme connue (bille. Cône ou pyramide) à la surface du matériau à tester (figure 4) .sous l'action de la charge d'indentation .l'indenteur s'enfonce dans le matériau en produisant des déformations élastique et plastique dans la zone de contact. A la suppression du chargement, une empreinte résiduelle persiste.

les essais d'indentations instrumentés mettent en évidence des instabilités, appelés pop-in sur les courbes de chargement, instabilités qui correspondent à la formation des fissures et qui peuvent être reliés à la ténacité du matériau

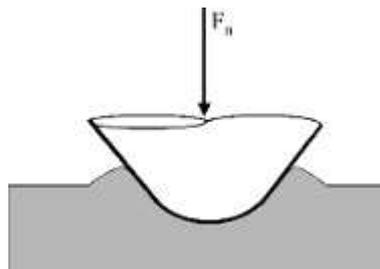


Figure 4 : Schéma de l'essai d'indentation

5.2 Différents types d'indenteur

Les indenteur pour l'essai d'indentation ont des géométries identiques ou similaires que celles pour l'essai de dureté. En général, la géométrie d'un pénétrateur est soit sphérique (Brinell), soit pyramidale (Vickers, Knoop, Berkovich ou Cube Corner) comme présenté sur la Figure 05

Afin de caractériser le matériau indenté, la géométrie de l'indenteur doivent être parfaitement connus. Bien qu'il y ait de nombreuses géométries possibles, seules les géométries normalisées des indenteurs en forme de pyramide de type Vickers et de type Berkovica sont très communément utilisés. De plus, l'indenteur Berkovica est le type le plus fréquent utilisé dans le cas d'indentation de faible amplitude, parce que sa géométrie d'une pyramide à trois faces (un tétraèdre) a un avantage que les bords de la pyramide sont plus facilement construits pour rencontrer à un seul point, plutôt que la ligne inévitable qui se produit au sommet de la pyramide Vickers à quatre faces. Le matériau d'un indenteur est souvent du diamant mais d'autres matériaux sont aussi utilisés comme le saphir, le carbure de bore et le carbure de tungstène.

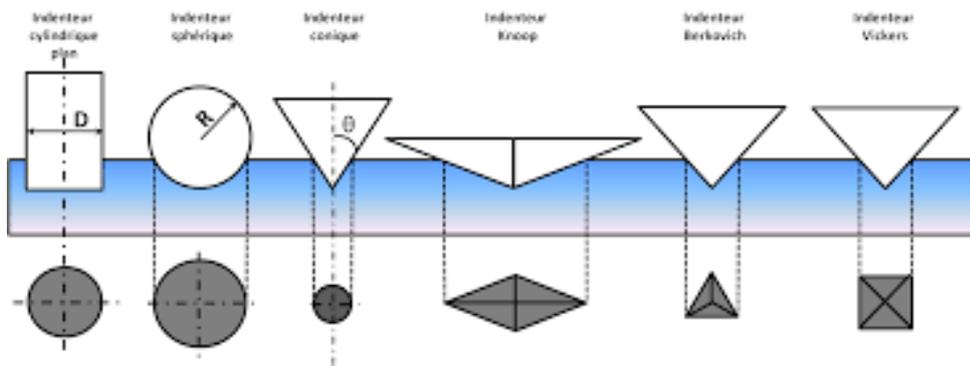


Figure 5: Schéma de différents types de pointe et d'empreintes correspondantes.

Chapitre II

Caractérisation Des Matériaux Utilisés Et Méthodes Expérimentales

1. INTRODUCTION :

L'emploi judicieux des matériaux de construction exige la pré-connaissance de leurs diverses propriétés ; physiques et mécaniques, afin d'obtenir le meilleur choix répondant à leur destination. Les informations concernant les matériaux utilisés doivent être récoltées par des techniques fiables tout en préférant les essais normalisés. En plus, il est nécessaire que les matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène possédant par conséquent des propriétés uniformes.

Par ailleurs, il faut choisir des essais adéquats pour parvenir à un meilleur contrôle des propriétés rhéologiques et mécaniques des formulations confectionnées. Les points précédents doivent être donc clarifiés avant de présenter les résultats obtenus. Pour cela, ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser nos bétons, à l'état frais et durci.

Ajoutons enfin que la caractérisation physique des matériaux et les essais durabilité des bétons sont réalisés dans le Laboratoire de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi tandis que la caractérisation mécanique des matériaux ainsi les essais mécaniques sur bétons sont effectués dans le Laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de setif.

2. Les matériaux utilisés

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de Bordj Bou Arreridj

Les matériaux utilisés sont:

- Un gravier (3/8) de carrière BELIMOUR BBA
- Un gravier (8/15) de carrière EL HAMADIA BBA
- Un gravier (15/25) de carrière EL HAMADIA BBA
- Un ciment CPJ42.5 : de la cimenterie de Hadjar Essoud
- Eau de gâchage: c'est l'eau potable du laboratoire
- Additions minérales Les fumées de silice

Les adjuvants Les plastifiants réducteurs d'eau et les super plastifiants



Figure 1 : Un gravier G8/15.



Figure 2 : Un gravier G3/8.



Figure 3 : SABLE BOU SAADA.



Figure 4 : CIMENT 42 .

3. Essais de caractérisation des matériaux

L'analyse granulométrique (NF P 18-56) L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un échantillon. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (Figure 8.9). L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis [23].

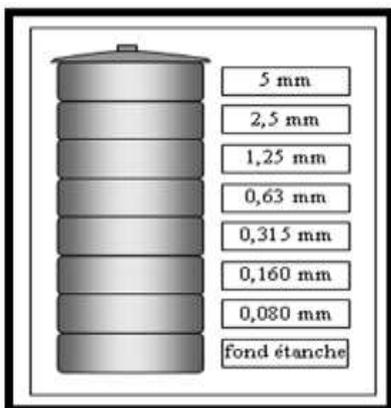


Figure 5: Tamis d'analyse granulométrique .



Figure 6:TAMISSEUSE.

- a) Verser l'échantillon séché dans la colonne des tamis classés de haut et en bas dans l'ordre de maille décroissante.
- b) Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne puis prendre et agiter un par un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adoptant un fond et un couvercle. Le tamisage est considéré terminé lorsque le refus ne se modifie pas de plus de 1% en une minute de tamisage.
- c) Peser le refus dans chaque tamis, et cumuler avec les précédents.

4. Formulation du béton ordinaire :

Formulation du béton ordinaire par la méthode de Dreux-Gorisse

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des granulats, où l'on dispose le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction de l'ouvrage désiré.

La composition des bétons de cette étude est calculée par la méthode de Dreux-Gorisse. La propriété mesurée à l'état frais est la maniabilité déterminée par l'affaissement au cône d'ABRAMS.

Données de base

Le but de cette formulation est de produire un béton courant de résistance caractéristique envisagée en compression de 30 MPA à 28 jours.

4.1 Matériaux utilisés

- Le sable fin de la région Boussaâda
- Le gravier 3/8 et 8/16 mm
- Le ciment portland composé - CEM-I/A 42.5
- L'eau potable du laboratoire (laboratoire de génie civil)

a. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment portland composé de classe CPJ-CEM II/A 42,5 répondant à la norme Algérienne NA 442, dont la composition minéralogique est calculée suivant la méthode de BOUGUE et la composition chimique est réalisée par le laboratoire de la cimenterie de AINLKBIRA

b. L'eau de gâchage

L'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité (distribuée par les services publics). L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impureté qui peuvent détériorer les propriétés du béton (résistance, propriétés esthétiques). Une partie

de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton.

c. Le sable : Nous avons utilisé un sable de BOUSSADA

d. Le gravier :

Les fractions du gravier utilisé pour cette étude sont :

- Fraction 8/16 mm
- Fraction 3/8 mm
- Fraction 15/25mm

e. Additions minérales : Les fumées de silice

f. Les adjuvants : Le Filler Super plastifiants

- Résistance visé à 28 jours : **30 MPA.**
- **BO = C + E + G + S ,**
D = 20 mm.

• Béton de consistance plastique. E/C = 0,5 G/S = 1,78 G = 64% et S = 36% Ciment de classe

4.2.5. Additions (fines) = 0

- Coefficient de compacité du béton : $\gamma = 0,825$
- Les densités absolues sont supposées les suivantes : Sable : **2,54, Gravier 2,62.** Ciment :

4.2 les formules des calculs :

Résistance estimée du béton à 28 Jours :

$$f_{cj} = f_{mj} \cdot K_b \cdot \left(\frac{C + kA}{E + v} - 0.5 \right)$$

avec f_{mj} : résistance du ciment au jour j (tableau G)
 K_b : facteur granulaire (tableau H)
E et v : volume d'eau et d'air respectivement

Tableau 2: Relation entre consistance cible, demande en eau et teneur en air

Consistance	Affaissement au cône (cm)	Eau (E) (Um3)	Air (a) (Um3)
Ferme	0-4	160	25
Plastique	5-9	190	20
Très plastique	10-15	210	15

Des corrections sont apportées en fonction de la taille et de la forme des granulats (+10% si l'on emploie des granulats concassés).

Tableau 2: Valeurs estimées de f_c 28jours.

Classe du ciment	F (MPa)
32.5	45
42.5	55
52.5	65

Tableau 3: Valeurs estimées de K

Nature pétrographique des granulats D(mm)	10-16	20-25	30-40
Silicieux, légèrement altérés	0.45	0.50	0.55
Silicieux, roulés	0.50	0.55	0.60
Calcaires, durs	0.55	0.60	0.65

4.3 Résultats :

En utilisant le tableau cité en haut, et pour un béton de consistance PLASTIQUE, la quantité d'eau nécessaire pour 1 m³ de béton est **190** litres, et la quantité d'air est **20** litres.

Si on utilise des granulats CONCASSENT₂, on doit majorer ces quantités de **10 %** :

Nouvelles quantités :

$$E = 1,10 \times 190 = \mathbf{209} \text{ Litres et } v = 1,10 \times 20 = \mathbf{22} \text{ litres.}$$

$$E/C = 0,5 \quad \text{d'où} \quad C = 2 \times E = 2 \times 209 = \mathbf{418} \text{ Kg.}$$

Résistance théorique estimée du béton à 28 Jours :

$$F_{cj} = 55 \times 0,55 \times [(418/231) - 0,5] = \mathbf{39,61MPa.}$$

Pour des raisons de sécurité on estime obtenir une résistance à 28 jours de l'ordre de **30MPa (BO30)**.

Coefficient de compacité du béton :

$$\gamma = 0,825 \text{ d'où : } C + G + S = \mathbf{825} \text{ litres.}$$

$$C = 418 \text{ kg } / 3,1 = \mathbf{135} \text{ Litres}$$

$$\text{D'où : } 135 + (G + S) = \mathbf{825} \text{ litres. Implique : } (G + S) = 825 - 135.$$

$$\text{Donc } (G + S) = \mathbf{690} \text{ litres.}$$

$$G = 0,64 \times 690 = \mathbf{441,60} \text{ litres} = 2,62 \times 441,60 = \mathbf{1157} \text{ Kg.}$$

$$S = 0,36 \times 690 = \mathbf{248,40} \text{ litres} = 2,54 \times 248,40 = \mathbf{631} \text{ Kg.}$$

$$\checkmark \text{ Vérification : } C + G + S = 825 \text{ litres ? : } 135 + 441,60 + 248,40 = \mathbf{825} \text{ litres} \quad \mathbf{OK.}$$

Densité du béton : le poids en kg d'un 1 m³ de béton :

$$C + E + G + S = 418 + 209 + 1157 + 631 = \mathbf{2415} \text{ Kg/m}^3.$$

✓ Cette densité est à vérifier en laboratoire.

On détermine les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :

Tableau 4: Les constituants du béton pour une éprouvette 16/32

Eau (l)	1.33 L
Ciment (kg)	2.67 KG
Filler (ou FS) (kg)	
Sable (kg)	4.038 KG
Gravier (kg)	7.40 KG
SP (kg)	

Pour 03 éprouvettes 16/32 :

Tableau 5: Les constituants du béton pour 03 éprouvettes 16/32

Eau (l)	3.99 L
Ciment (kg)	8.01 KG
Filler (ou FS) (kg)	
Sable (kg)	12.11 KG
Gravier (kg)	22.2 KG
SP (kg)	

Pour 03 éprouvettes 16/32 + 20 % des constituants :

Tableau 6: Les constituants du béton pour 03 éprouvettes 16/32 + 20% des constituants

Eau (l)	4.78L
Ciment (kg)	9.61 KG
Filler (ou FS) (kg)	
Sable (kg)	14.53 KG
Gravier (kg)	26.64 KG
SP (kg)	

5.formulation des bap 30

Les données de base : on a choisi :

- $G/s=0.9$
- On fixe le rapport $E/(C+F)=0.38$
- Le dosage en super plastifiant est donné selon la fluidité (donné par l'essai d'étalement) On vise un étalement de 660 a750mm.

a. Optimisation de la composition du BAP :

Le volume de la pâte pour 1m³ du BAP égale a 340l/m³ :

- **430kg/m³** du ciment
- **43kg/m³** du filler calcaire (10% du poids du ciment)
- $E/(C+F)= 0.38$

- $G/S = 0.9$

b. Détermination de la masse de chaque constituant :

On a :

- $C = 430 \text{ kg/m}^3$
- $F = 43 \text{ kg/m}^3$
- $C/(E+F) = 0.38$ Donc $E = 0.38 * (430 + 43) \rightarrow E = 179.74 \text{ l/m}^3$
- Volume de la pâte est égal à 340 l/m^3
- Volume des granulats est égal à 660 l/m^3
- $G/S = 0.9$; $G + S = 660 \rightarrow G = 660 - S$; $S = 660 / 1.9$
 $\Rightarrow S = 347.37 \text{ l/m}^3$
 $\Rightarrow G = 312.63 \text{ l/m}^3$

• Le dosage en super plastifiant est **1.7%** de la masse de ciment et filler :
 $SP = 0.017 * (430 + 43)$

• L'extrait sec du super plastifiant est de **30%** ; donc ; la quantité d'eau provient de super plastifiante est de $0.7 * 8.041 = 5.628$

D'où la quantité d'eau utilisée pour 1 m^3 est de **174.12 l/m³**

c. Les masses des constituants pour 1 m^3 du BAP comme un témoin (BAP) sont :

- Eau = **174.12 l**
- Ciment = **430 kg**
- Filler = **43 kg**
- Sable : - Sable Grossier = **595.98 kg** (63.87%)
- Sable Fin = **335.939 kg** (36.22%)
- Gravier : - Classe 3/8 : **440.808 kg** (50%)
- Classe 8/15 = **415.798 kg** (50%)
- $Sp = 1.7\% = 80.047 \text{ Kg}$

On détermine les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :

Tableau 7: les constituants du béton pour une éprouvette 16/32

Eau (l)	1.11 L
Ciment (kg)	2.75 Kg
Filler (ou FS) (kg)	0.270 KG
Sable (kg)	1- 3.81 KG

	2- 2.15 KG
Gravier (kg)	3/8 2.82 8/15 2.66 KG
SP (kg)	0.051 KG

Pour 03 éprouvettes 16/32 :

Tableau 8: les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32

Eau (l)	3.33 kg
Ciment (kg)	8.25 kg
Filler (ou FS) (kg)	0.81 kg
Sable (kg)	S1 11.43 kg S2 6.45kg
Gravier (kg)	3/8 = 8.46kg 8/15 = 7.98 kg
SP (kg)	0.153 kg

Pour 03 éprouvettes 16/32 + 20 % des constituants :

Tableau 9: Les constituants du béton pour 03 éprouvette 16/32+ 20% des constituants

Eau (l)	3.99 kg
Ciment (kg)	9.9 kg
Filler (ou FS) (kg)	0.97 kg
Sable (kg)	S1 = 13.71 S2 = 7.74
Gravier (kg)	G3/8 = 10.15 G 8/16 = 957
SP (kg)	0.183

5.1 Caractérisation des BAP à l'état frais :

5.1.1 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 (fig11).

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 **50cm** 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 [24]

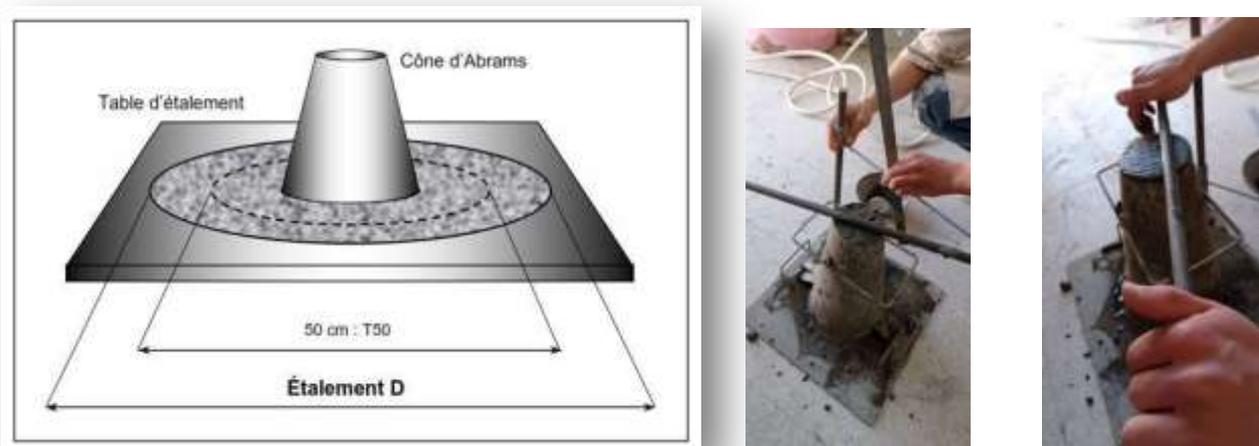


Figure 7 : essai d'étalement.

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés l'Etat frais des bétons auto plaçant :

- 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.

5.1.2 Essai de la boîte en L (L-box test)

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique La partie verticale du L (Figure 1.4) 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 Ø 14) qui correspond à des ouvrages très ferrailés mais qui peut être éventuellement allégé (**58** mm d'espace libre entre deux barres)

Pour que le béton auto plaçant 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 [25].

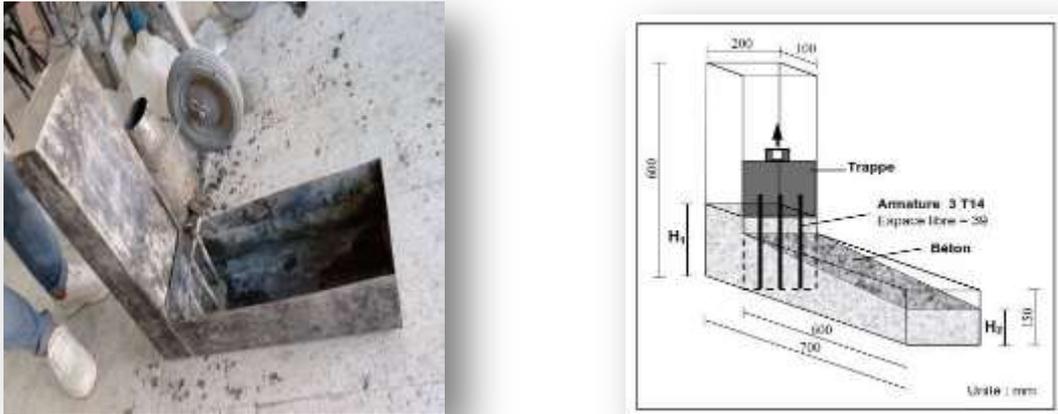


Figure 8: la boîte en L.

5.1.3 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons auto plaçant, il vise à qualifier les bétons Auto plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation (fig. 14). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [26].

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton auto plaçant sont divisés en trois classes [27] :

- $0\% \leq \% P_{\text{laitance}} \leq 15\%$: 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.

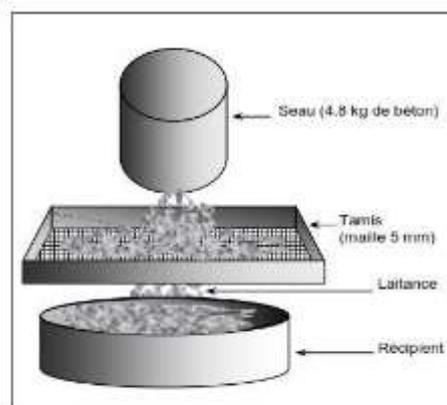


Figure 09 : Essai de stabilité au tamis

6. Formulation pratique d'un bhp

Les données de base : on a choisi :

BHP: = C + E + G + S + SP + FS, D = 20 mm.

Propriétés spécifiques des granulats adaptées aux BHP.

- G/S = 1.45, → G = 59 % et S = 41 % Affaissement au cône de 220 ± 20 mm
- Dosage optimal fixe en fumées de silice (FS) de 8.5 %,
- Paramètre E/L = [E/(C+FS)],
- Densités : (ciment : 3.14, SP : 1.21, FS : 2.2),
- E/C = 0,35
- Ciment de classe 42,5.
- Dosage en ciment : 400 Kg/m³.
- Additions (fines) = FS
- Qualité des gros granulats : Moyenne.

a. Méthode appliquée :

Utilisation des abaques de (Rougeron et Aitcin, 1994).

Tableau 10: Dosage en gros granulats

Forme des particules	Allongé ou plate	Moyenne	Cubique	Arrondie
Dosage en gros granulats (kg/m ³)	1000	1050	1100	1150

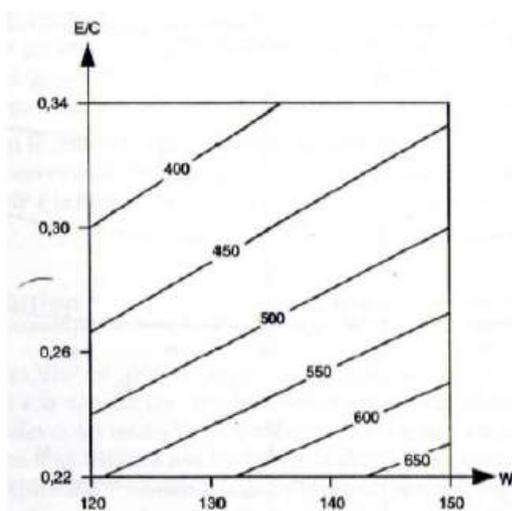


Figure 10: Dosage en super plastifiant (%)

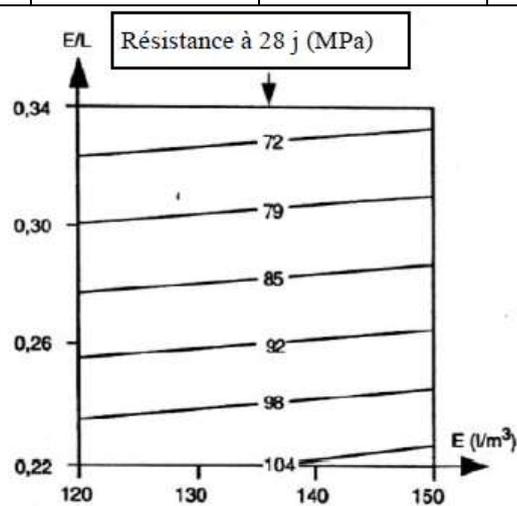


Figure 11: Dosage en ciment (Kg/m³)

6.1 Résultats :

Dosage en gros granulats : d’après le tableau ci-dessus, et si on considère une qualité des gros granulats : **Moyenne**. D’où

- **G = 1050 kg.**
- Sable : $S = 1050 / 1,45 = 724 \text{ Kg.}$
- $E/C = 0,35$, et **C = 400 kg**, d’où $E = 400 \times 0,35 = 140$ litres.
- $FS = 8,5 \times 400 / 100 = 34 \text{ Kg.}$
- $E/L = E / (C+FS) = 140 / (400 + 34) = 0,32$.
- $E/L = 0,32$ et **E = 140 litres,**
- $SP = 0,85 \times 400 / 100 = 3,4 \text{ kg.}$ L’abaque plus haut donne une quantité de **SP = 0,85 %**

de la masse de ciment

L’abaque donnera pour $E/L = 0,32$ et **E = 140 Litres** une résistance de **72 MPa**, pour des raisons de sécurité on estime une résistance de de **50 MPa**.

On détermine les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :

Tableau 11:les constituants du béton pour une éprouvette 16/32 :

Eau (l)	0.89 l
Ciment (kg)	2.56 kg
Filler (ou FS) (kg)	0.21 kg
Sable (kg)	3.64 kg
Gravier (kg)	6.72 kg
SP (kg)	0.02 kg

Pour 03 éprouvettes 16/32 :

Tableau 12:les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32 :

Eau (l)	2.68 kg
Ciment (kg)	7.68 kg
Filler (ou FS) (kg)	0.65 kg
Sable (kg)	13.90 kg
Gravier (kg)	20.16 kg
SP (kg)	0.065 kg

Pour 03 éprouvettes 16/32 + 20 % des constituants :

Tableau 13 :les constituants du béton pour 03éprouvettes 16/32 + 20% des constituants

Eau (l)	3.22 kg
Ciment (kg)	9.21 kg
Filler (ou FS) (kg)	0.78 kg
Sable (kg)	16.68 kg
Gravier (kg)	24.19 kg
SP (kg)	0.07 kg

6.2 Caractérisation des BHP à l'état frais

a. Essais au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement est le plus couramment employé pour caractériser le béton sur Chantier. Il permet de mesurer la consistance d'un béton qui est une grandeur qui sert à Caractériser l'aptitude à sa mise en œuvre. L'essai a été effectué conformément aux Prescriptions de la norme à l'aide du cône d'Abrams

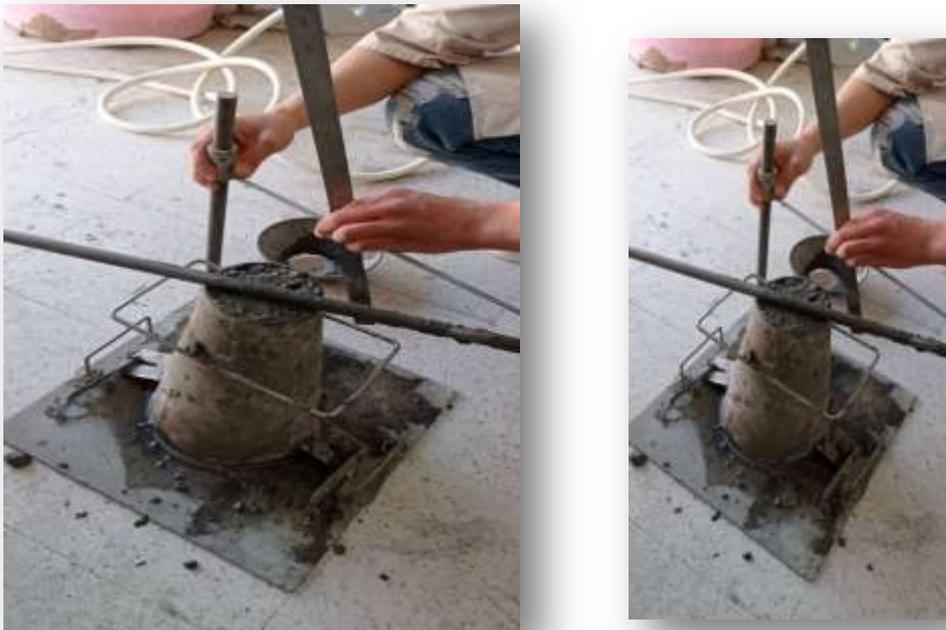


Figure.12 : Affaissement au cône d'Abrams

b. Essai de la masse volumique

La densité réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'un récipient rempli de Béton selon un moule de remplissage analogue à celui utilisé pour le remplissage de Éprouvettes cylindrique.

Le Béton hautes performances est soumis aux mêmes types d'essais que les bétons ordinaires dans le cadre de leur conformité à la norme NF EN 206-1, par exemple :

- Consistance mesurée au cône d'Abrams
- Résistance à la compression

Il y a aussi divers essais complémentaires permettent de mesurer les propriétés du Béton hautes performances aussi bien au stade de mise au point de la formulation, que lors des convenances, ou des contrôles sur chantier.

- Étalement à la table à secousse
- Rhéomètre
- Méthode des coulis de l'AFREM
- Méthode du Mortier de Béton Equivalent (MBE)

7. LES ESSAIS MECANIQUES

7.1 Essai de compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm. Ce test consiste à soumettre l'éprouvette placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon.

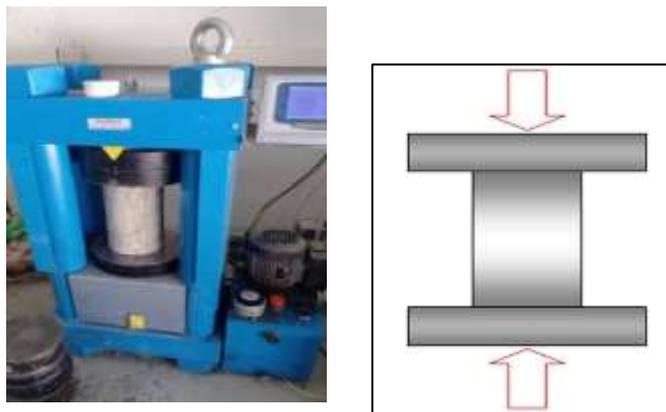


Figure 13 : schéma démonstratif de l'essai de compression

En utilisant le modèle réglementaire suivante ; on évalue le module du béton en fonction de sa résistance

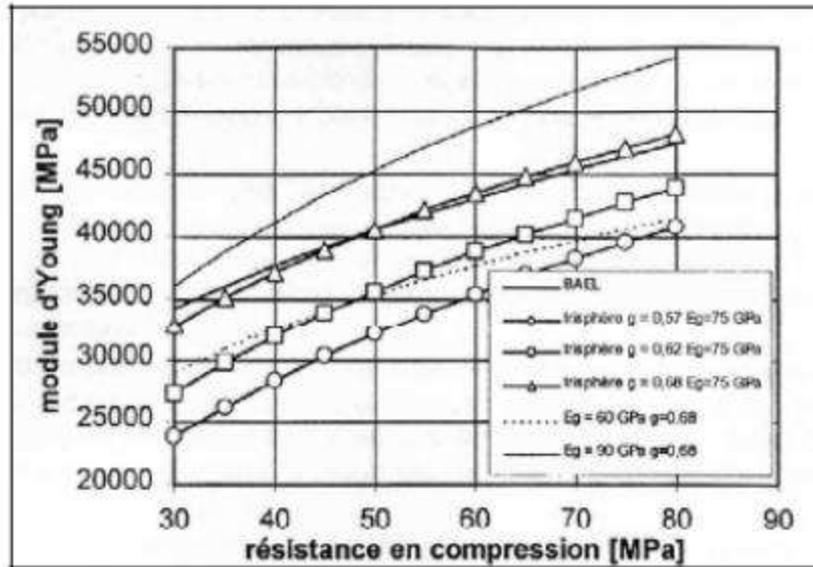


Figure 14 :le modèle réglementaire

8. PARTIE PRATIQUE AU LABORATOIRE :

8.1 Formulation des bétons d'étude

- La composition du béton ordinaire de cette étude est calculée par la méthode de Dreux.
- La composition du béton auto plaçant de cette étude est calculée par la méthode Japonaise.
- La composition du béton à haute performance de cette étude est calculée par la méthode des coulis AFREM.

8.2 Étapes de confection du béton

Dans cette partie on explique le mode de travail de notre étude, après la détermination des quantités des composants de chaque méthode pour un mètre cube de béton, on doit transférer les quantités pour un volume d'éprouvette de 16/32 cm³.



Figure 15 : Moule cubique 16*32 cm³

8.3 Préparation des mélanges

➤ Nous mettons les matériaux à mélanger en quantités mesurées dans le mélangeur et le laissons quelques minutes en versant de l'eau

a. Malaxage (NF EN 206-1) Dans notre cas les matériaux (gravier (3/8) et (8/16), sable (0/5), ciment) et (fillers dans les BAP et BHP) sont malaxés à sec pendant 1 min dans une bétonnière à axe incliné, et le malaxage en présence d'eau de gâchage et (super plastifiants dans les BAP et BHP) est de 2min.



Figure 16: malaxage des matériaux au niveau de laboratoire.



Figure 17: la mise en place du béton

b. Mise en place du béton dans les moules

- Après le succès des expériences des préparations à l'état frais, la mise en place du béton dans les moules 16/32 est assurée.
- La conservation des éprouvettes avant démoulage: L'arasement terminé, les éprouvettes sont conservées, sans être déplacées pendant 24 heures \pm 1 heure, au sein de notre laboratoire à la température d'environ $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et chacune d'entre-elle est numérotée.
- Après démoulage, les échantillons ont été conservés à la même température, sous eau pendant 28 jours

L'essai de résistance à la compression (EN 12390-3)

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cubiques (16x16x32 cm). L'éprouvette est centrée et fixée entre les plateaux d'une presse hydraulique chargé avec une vitesse constante. L'essai de compression est conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvettes

c. Le découpage des éprouvettes :

Le découpage des éprouvettes du béton pour le prochain essai, l'essai d'indentation. Les échantillons sont découpés à l'aide d'une machine de découpage en petits cubes de 5cm de longueur.



Figure 18: Le découpage des éprouvettes du béton.

d. Rodage et polissage

Le rodage et le polissage est effectué sur la même machine classique polisseuse de type Struer Labo Pol.1 au niveau de l'unité de recherche des matériaux émergents de l'université FARHAT Abbes de SETIF. Cette dernière est constituée d'un disque tournant, joue le rôle d'un porte outil à papier abrasif, et qui tourne à une vitesse de rotation moyenne de 100 à 300 tr/min.

Le principe de rodage et polissage est réalisé par les différentes tailles abrasives soit : grossières, moyennes (semi finition) puis fines (finition). Les papiers abrasifs sont collés sur le disque de polissoir qui tourne en sens inverse de l'échantillon mobile (Béton Auto Plaçant) et porté à la main par un manipulateur. Le temps de rodage et polissage semi fini du béton BAP est difficile à rodé où le temps de rodage est important qui varie de 45 à 90 min, par contre la finition (polissage fini) des échantillons nécessite un temps de polissage court pouvant aller jusqu'à 20 minutes.

Durant l'opération l'eau alimente la zone de travail.



Figure 19 : Rodage et polissage du matériau Bo BAP BHP.

Le tableau ci-dessous présente les différentes étapes de rodage et polissage.

Tableau 14:Etapes de polissage du Béton BAP

Type de papier	Temps de polissage	Lubrifiant	Vitesse de rotation
200/500/800	≈ 45 à 90 min for each	Water	150tr/min
1000/2000/2400/4000	≈ 20 min for each	Water	150-200tr/min

9. Conclusion :

Nous avons montré dans ce chapitre une caractérisation sur les matériaux utilisées dans notre projet, ainsi que les procédures expérimentales qui vont nous permettre d'analyser nos résultats afin d'évaluer l'influence de la méthode de formulation du béton sur sa résistance à la compression.

Chapitre III :

**L'INDENTATION DU BETON
ET ETUDE DE CORRELATION**

1. INTRODUCTION

L'indentation instrumentée est utilisée pour caractériser et d'analyser. Les propriétés mécaniques des surfaces de divers matériaux telles que : la dureté H, le module Young E et/ou encore la résistance la fissuration. Généralement, cette technique permet d'estimer la ténacité, K_{IC} , de matériaux fragiles

A partir des années 80, l'indentation instrumentée apparaît et conduit à l'essor de ces techniques de caractérisation mécanique des surfaces. De nombreux conférences et numéros spéciaux de revue sont consacrés à ce sujet [28]

2. L'essai de l'indentation

2.1 Principe de l'essai

Le principe de l'essai d'indentation consisté a appliqué une charge sur un indenteur de forme connue (bille. Cône ou pyramide) à la surface du matériau à tester (figure 1) .sous l'action de la charge d'indentation .l'indenteur s'enfonce dans le matériau en produisant des déformations élastique et plastique dans la zone de contact. A la suppression du chargement, une empreinte résiduelle persiste.

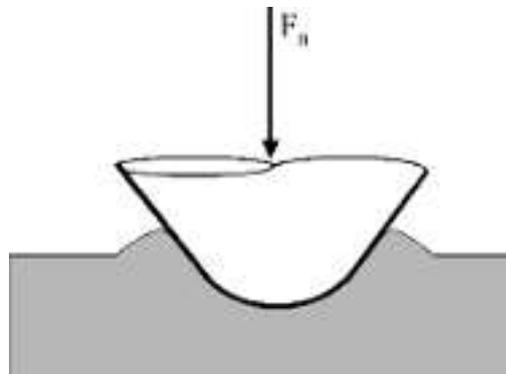


Figure 1 : Schéma de l'essai d'indentation.

La dureté est définie par la relation suivante :

$$H = P/A$$

Où

H : La dureté exprimée MPA enMPA

P : La charge exprimée en Newton (N)

A : L'aire de l'empreinte exprimée en mm²

Il existe deux méthodes pour mesurer la dureté d'un matériau quelconque, qui se distinguent par la manière dont est déterminée l'aire de l'empreinte, soit par l'indentation conventionnelle (analyse de l'empreinte après le retrait de l'indenteur), soit par l'indentation instrumentée (à partir de l'analyse de la courbe charge-pénétration après le test d'indentation).

3. Indentation conventionnelle:

La surface de l'empreinte est mesurée quand l'indenteur (poinçon) est éloigné du matériau. A partir de la connaissance géométrique de l'indenteur, la mesure d'une dimension dans le plan de la surface du matériau (diagonale ou diamètre selon la forme de l'indenteur) est généralement suffisante pour accéder à la surface, qu'elle soit de contact ou projetée. Nous allons donner le principe de dureté conventionnelle les plus reconnus, où la plupart du temps sont utilisées dans les laboratoires industriels

3.1 Dureté Brinell :

L'essai de Brinell a été découvert en 1901[29], cette échelle permet de mesurer la dureté des matériaux, par la compression d'une bille en acier sur le matériau que l'on désire tester. L'essai Brinell est rapide et facile à mettre en œuvre, Le principe consiste à appliquer sur la surface du matériau une bille en matériau dur d'un certain diamètre avec une charge donnée. Après le retrait de l'indenteur, on mesure la taille de l'empreinte qui est équivalente à une calotte sphérique.

La dureté Brinell est notée par les deux lettres HB ou BH, le sigle complet est BHN pour Brinell Hard ness Number [30.31].

L'expression simplifiée de la dureté Brinell est définie par :

$$HB = \frac{2F}{g \cdot \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec :

F : Charge appliquée exprimée en N

D : Diamètre de la bille en mm

d : Diamètre de l'empreinte résiduelle exprimée également en mm

: Accélération terrestre exprimée en m·s⁻², elle est de l'ordre de 9,80665

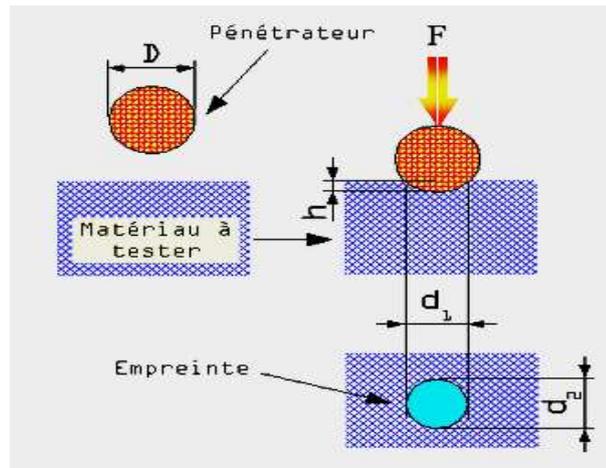


Figure 2: Schéma du Principe de la dureté Brinell.

3.2 Dureté Vickers

La figure 3 présente le principe de l'essai de dureté Vickers. Il est identique à celui de l'essai Brinell. Seulement l'essai Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a la forme d'un carré. Après l'indentation, on mesure la moyenne des diagonales d_1 et d_2 de l'empreinte en microscopie optique [32]. L'avantage d'un pénétrateur pyramidal réside durant la variation de la charge par l'obtention des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté. Comme inconvénient, l'essai est long à mettre en œuvre : polissage miroir d'une face (les rayures résiduelles ne doivent pas gêner la mesure des dimensions), temps de lecture (mesure des dimensions à la loupe graduée et vis micrométrique).

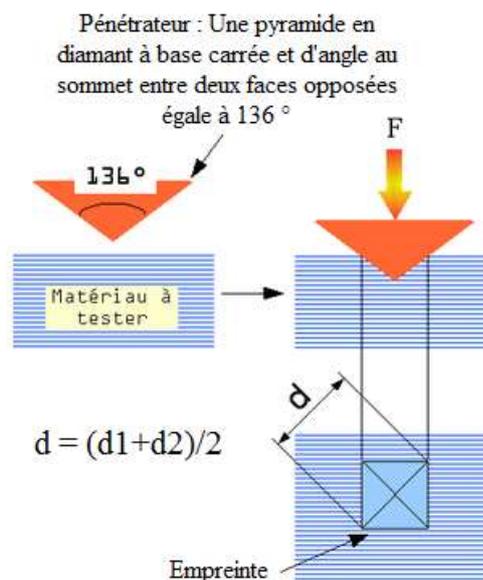


Figure 3: Schéma du principe de la dureté Vickers

L'expression de la dureté VICKERS H V est définie par [33]:

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

Par simplification, la relation (4.3) devient alors :

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4.4)$$

Où :

HV : Dureté Vickers.

F : Force appliquée exprimée en N.

D : La moyenne des diagonales de l'empreinte exprimée en mm.

3.3 Dureté Rockwell

L'essai de dureté Rockwell consiste à imprimer en deux temps dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur qui peut être un cône ou une bille et mesurer l'accroissement rémanent de la profondeur de pénétration. Cet essai permet une lecture directe mais ne convient pas aux pièces moulées ou à gros grains.

Il existe plusieurs essais de dureté Rockwell, les principaux étant les essais Rockwell HRC et les essais Rockwell HRB.

a) Dureté Rockwell HRC

La figure 4 montre le principe de dureté Rockwell. Il consiste à mesurer la profondeur de pénétration. Le pénétrateur a une forme conique diamanté de 120° et arrondi de 0,2 mm, La charge appliquée est de 1370N [34].

Plus précisément l'essai de dureté Rockwell HRC se réalise comme suit :

- On effectue un pré-chargement avec une force F0 ;
- On applique une force supplémentaire F1 puis on la relâche ;
- On regarde la profondeur que l'on a gagnée

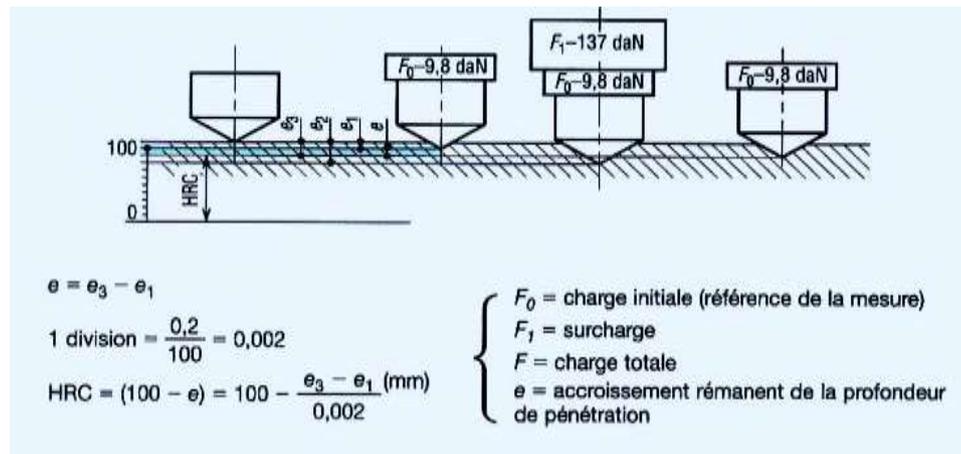


Figure 4 : Schéma du principe de la dureté Rockwell HRC [34].

3.4 Dureté Knoop

La figure 5 montre le principe de dureté Knoop. Le pénétrateur est en diamant de forme géométrique pyramidal à base losange. L'angle au sommet dans le sens de la grande diagonale est de $172^{\circ}.30'$ et l'angle transversal est de 130° .

L'avantage du pénétrateur Knoop permet de donner une empreinte suffisamment grande pour une très faible charge, en sollicitant donc un volume très réduit de matière [35]. La dureté Knoop HK s'exprime par le rapport de la charge appliquée F à la surface projetée A de l'empreinte :

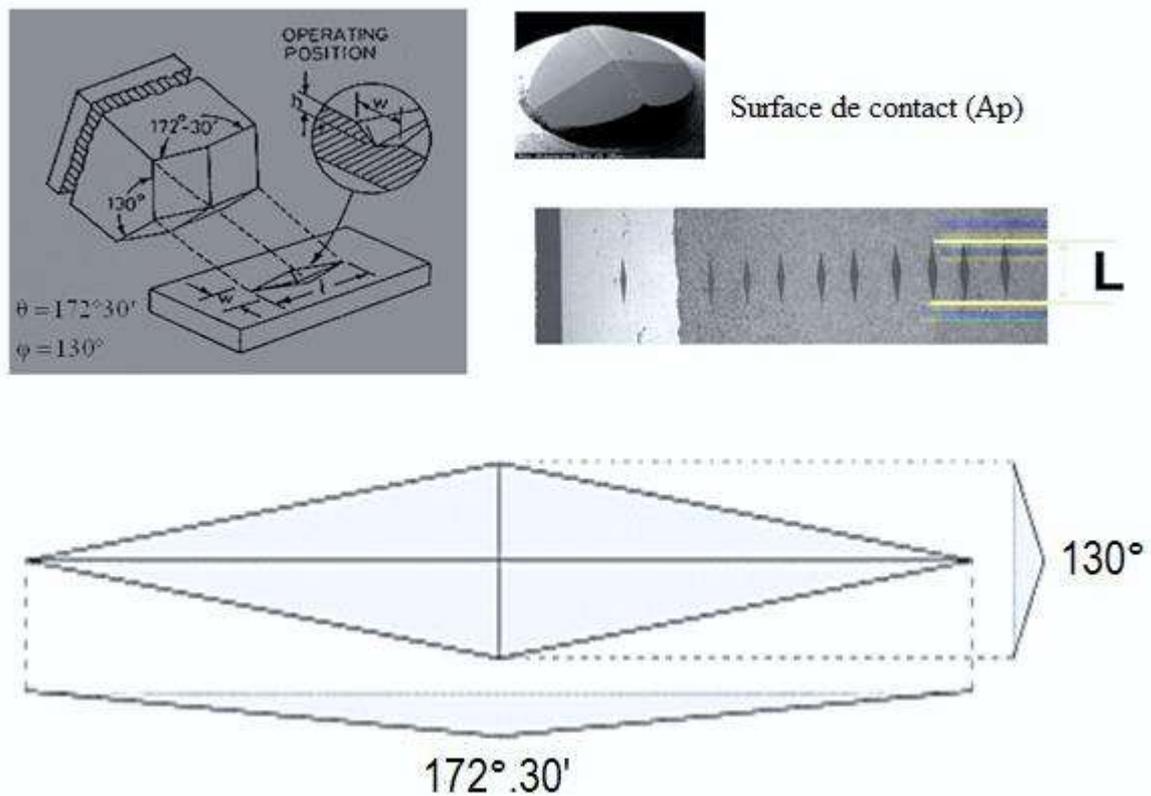


Figure 5 : Schéma du principe de la dureté Knoop HK [35].

4. Indentation instrumentée

4.1 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 composé sinter métalliques [36]. ont été publiés sur l'étude du comportement de rupture dans la céramique[37,38], du comportement mécanique des couches minces [39-40] , des os [41], les efforts résiduels[42] et le comportement dans les polymères [43-46].

4.2 Technique et analyse

La technique d'indentation instrumentée permet de construire la courbe charge-pénétration de l'essai d'indentation. La phase de charge correspond la pénétration de l'indenteur et la phase de décharge correspond au retrait de l'indenteur (fig.2.8). D'après cette figure, la courbe d'indentation permet d'obtenir des informations sur les propriétés élastiques et

plastiques de matériaux [44]. Lors de la décharge, deux phénomènes peuvent être observés. Au début, tout le solide subit un retour élastique. En fonction des propriétés élasto-plastiques des matériaux, il est possible qu'une partie du solide indenté plastifie une nouvelle fois en décharge. Toutefois, la courbe de décharge donne sur tout des informations sur l'élasticité du matériau [45].

Phases durant l'essai d'indentation

La figure 6 illustre un essai d'indentation Vickers qui, se décompose en trois phases :

Première phase (Chargement) :

Une fois le contact établi, la charge augment progressivement, l'indenteur s'enfonce jusqu'à

atteindre un seuil correspondant à un effort maximum ou un déplacement maximum.

Deuxième phase (Maintien) :

La charge maximale est maintenue pendant la durée voulue.

Troisième phase (Déchargement) :

La charge est progressivement diminuée jusqu'à l'annulation de celle-ci, c'est-à-dire la fin du

Contact entre l'indenteur et l'échantillon. Suivant le type d'essai, le chargement et le déchargement peuvent être contrôlés en effort ou en déplacement, de même que le seuil imposé en fin de chargement et lors du maintien peut être un effort ou un déplacement [46].

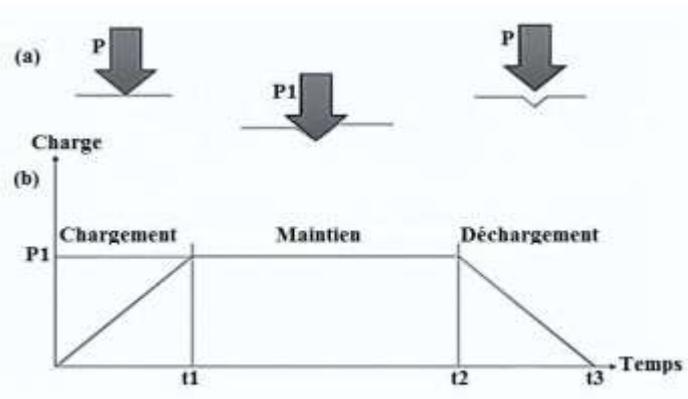


Figure 6 : Description d'un essai d'indentation à

Une vitesse de chargement et déchargement constante.

(a) Mouvement de l'indenteur et interaction avec la matière

(b) Charge en fonction du temps [46]

5. Caractérisation par indentation

Introduction

La caractérisation des propriétés mécaniques par indentation fait l'objet d'un intérêt scientifique important pour les matériaux fragiles tels que les céramiques et les verres. La technique d'indentation est souvent un instrument de base largement répandu dans les laboratoires industriels et de recherches. Les différentes méthodes utilisées pour estimer la ténacité par indentation ont fait l'objet de nombreux travaux publiés. Les équations pour les matériaux fragiles utilisent la mesure des fissures formées par l'indenteur ou les décrochements, pop-in, observés sur la courbe charge-déplacement quand l'essai est instrumenté. Les différentes équations sont établies en comparant ces résultats à la ténacité obtenue par les essais d'indentation classique. Les méthodes utilisées en indentation permettent généralement de déterminer la ténacité K_{Ic} par indentation avec une incertitude pouvant aller jusqu'à $\pm 50\%$ [47]. La caractérisation des matériaux dépend de l'état de surface donc de la méthode de préparation (rodage et polissage) et des défauts produits par cette dernière.

La détermination de la ténacité par indentation nécessite un matériau avec une surface plane, polie et un équipement expérimental adéquat pour mesurer la taille des fissures formées. De nombreuses relations ont été développées pour exprimer la ténacité en fonction du type de fissure. Ponton et al. [48-49] ont recensé les différents modèles existant à l'époque en fonction du type de fissures: Palmqvist (P), half-penny ou Médiane (M) (fig.2.10). Souvent les fissures sont de type P pour les faibles charges appliquées (charges relatives en fonction de la ténacité du matériau) et deviennent du type M quand les charges augmentent. La limite entre les deux types de fissure correspond à une valeur critique du rapport c/a . En règle générale, si $c/a \geq 2$, le modèle de fissuration est considéré être de type Médian (half-penny), et si $c/a < 2$, le modèle de fissuration est considéré comme étant de Palmqvist. Cependant pour d'autres auteurs la limite est $c/a = 2,5$ ou 3 [50-51].

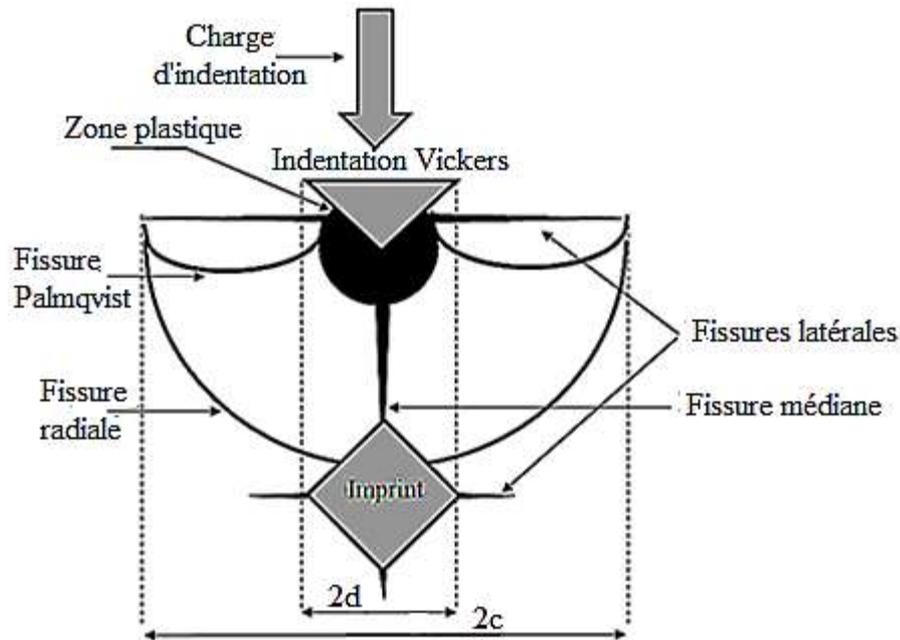


Figure 7 : Représentation schématique des systèmes de fissures induits par indentation Vickers

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie consiste à préparer les échantillons et procéder expérimentalement la fabrication de ces matériaux utilisés (BO30, BAP35.BHP). Les trois échantillons utilisés sont passés au principe de fabrication : Découpage, rodage et polissage par les papiers abrasifs au moyen d'une machine de polissage appelée polisseuse. Vue le COVID19 et vue les circonstances de contaminations, nous sommes limités d'étudier échantillon BO30, BAP35.BHP. Ces échantillons a été choisi et sélectionné au niveau de notre laboratoire de Génie Civil (**Matériau déjà pré-formulé**).

Dans la deuxième partie, et en utilisant la technique d'indentation classique par un indenteur Vickers, nous estimons la ténacité K_{Ic} à partir de la longueur de fissures formées par différentes relations en fonction des hypothèses faites sur la géométrie des fissures. Les résultats obtenus sur ces matériaux, ainsi que les dispersions de calcul, sont comparés

6. Matériaux et méthodes

6.1 Matériaux utilisés

Trois échantillons béton ordinaire BO30 .béton auto plaçant BAP35
Haute performance BHP

6.2 Technique d'indentation

6.2.1 Moyens utilisés

A/ Machine macro indentation

* L'indentation utilisée durant nos expériences au bloc de recherche d'un laboratoire de recherche Université Farhat Abbes de Sétif est une machine d'indentation type ZwickRoell ZHU 2,5 (fig. 3.4).

* Le test d'indentation est guidé par la norme ISO [48,50].

* L'étalonnage de la machine a été effectué avec la norme ISO 1477-3 [149,51].

* Les caractéristiques techniques de la machine sont les suivantes:

01/ Force (2 à 2500N): plage de résolution du capteur comprise entre 0,25% et 1%.

02/ Déplacement (5 μ m-1000 μ m): résolution du capteur de 0,05 μ m

03/ Dureté (1N / mm²-2.104N / mm²):

a - dureté Martens: résolution du capteur de 2%

b- dureté d'indentation: résolution du capteur de 2%.

* Module (10N / mm² 5.105N / mm²): incertitude de 2%

La machine d'indentation est pilotée par un logiciel test Xpert® qui permet d'obtenir des valeurs, des graphiques, des analyses numériques et des images de l'impression grâce à un microscope reposant sur le logiciel.



Figure 8 : Machine d'indentation Zwick ZHU 2.5

B/ Composition et principe de l'indenteur

La tête (poinçon) de la machine d'indentation est composée d'une coquille, de plusieurs capteurs pour mesurer la force et la profondeur, et un pénétrateur comme le montre la figure 3.5 :

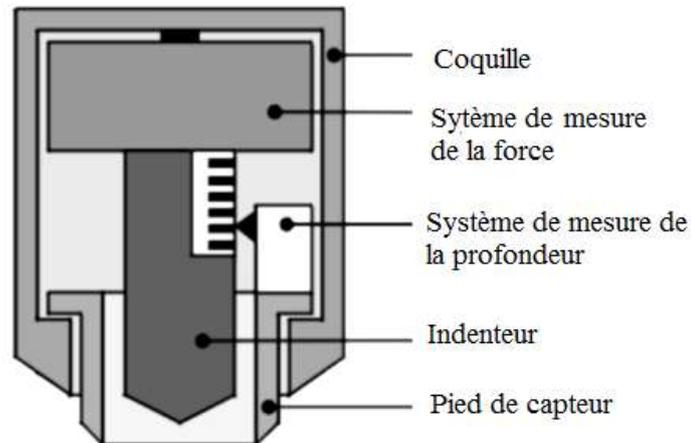


Figure 9 : Les éléments constructifs de la tête (poinçon) mesurant la dureté Zwick ZHU 2,5KN

La figure 3.6 montre des séquences d'indentation durant un test de dureté de Martens sur une surface d'un échantillon, le principe se fait comme suit :

- Au début le pied du capteur descend jusqu'à la surface à tester (étapes 1 à 2) ;
- La tête (poinçon) est abaissée jusqu'au pied du capteur et plus tard, le pénétrateur entre en contact avec la surface de l'échantillon (étape 3) ;
- Puis le chargement (étape 4) ;
- Et le déchargement (étape 5) est effectué et la tête est décalée vers la position de départ (étape 6).

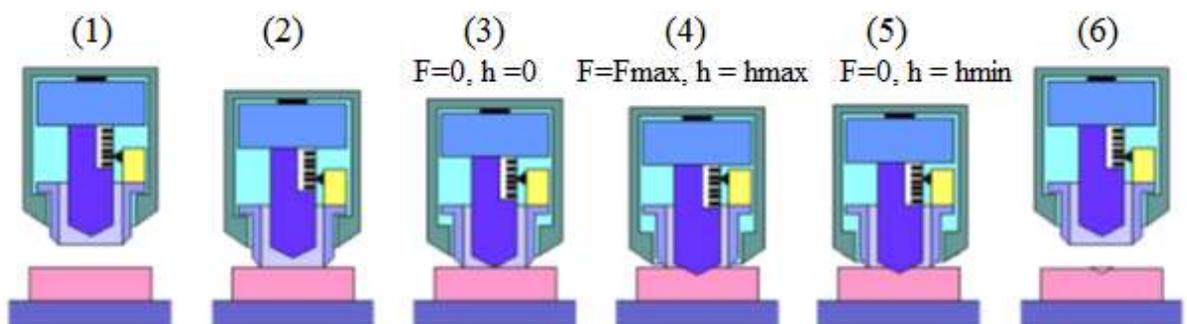


Figure 10 : Illustration de la séquence d'indentation pour le test de dureté Martens

Après le test d'indentation, les résultats ont été analysés par test Xpert®. Il a été possible de sélectionner différents résultats utiles pour l'étude: HV, Eit, hmax, F, et c.

Un microscope optique avec un grossissement global de x50 est utilisé pour observer l'empreinte sur l'échantillon.

Essai d'indentation

Les essais d'indentation sont effectués à l'aide du macro uromètre instrumenté Zwick ZHU 2.5.

Les charges appliquées permettant de mesurer la ténacité du béton auto plaçant sont de 5 à 20 N. (On a effectué et appliqué que des charges moyennes, puisque la machine à ce jour-là était en difficulté !!)



Figure 11 : Plusieurs essais effectués sur le béton BAP au moyen d'indentation Zwick ZHU 2.5

7. Etude de corrélation

7.1 Introduction :

Par manque de l'appareil d'indentation non disponible au niveau de l'université de Sétif (en panne), et à titre purement pédagogique, nous allons utiliser dans cette partie les résultats numériques obtenus par notre équipe de recherche (banque de données disponibles) durant les trois années précédentes dans le cadre de l'axe de recherche dirigé par les mêmes encadreurs de ce travail.

Avant d'entamer cette démarche, on préfère exposer quelques modèles de corrélation obtenus par les chercheurs sur les bétons (BO, BAP et BHP).

7.2 Modèles de corrélation :

On définit un modèles de corrélation une relation mathématique liant deux paramètres, l'un représente une caractéristique d'indentation ou de formulation d'un béton, et l'autre définit une grandeur de comportement mécanique, l'objectif est de caractériser mécaniquement un béton à travers un essai d'indentation en utilisant directement le modèle, sans passer par la démarche mécanique.

En utilisant la technique d'indentation sur les bétons, plusieurs modèles théoriques ont été proposés durant ces dernières années par la communauté scientifique. Citant d'abord les recherches proposées par GRAIRIA S. [54] dans sa thèse de Doctorat en Sciences, qui a étudié une gamme élargie comportant plusieurs classes de BO et de BAP. Il a proposé des modèles donnant les caractéristiques mécaniques des bétons obtenus par test d'indentation en fonction des paramètres de formulation (E/L). L'étude présente également une comparaison avec des travaux antérieurs.

Tableau 2.1. Résistance à la compression des différents bétons [54].

Béton	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BV1	BV4
E/Léq	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.53	0.36
fc _{28, cyl.} (MPa)	36.7	41.3	46.5	54.3	61.7	36.4	53.6

Les caractéristiques de fracture basées sur le test d'indentation Vickers donnent les résultats [54] suivants :

Tableau 2.2. Paramètres de fractures[54].

concrete Matrix	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BO1	BO4
w/b ratio	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.53	0.36
w/c ratio	0.51	0.48	0.46	0.43	0.41	0.53	0.36
Slope of $C^{3/2} = f$ (P)	36.29	34.47	32.56	30.40	28.71	41.61	33.09
KICM MPa.m ^{1/2}	2.27	2.39	2.53	2.71	2.87	1.98	2.49
G _{IC} (N/m)	145.72	197.07	271.08	351.64	427.08	136.82	305.35

L'auteur [54] a comparé ses résultats avec ceux obtenus par quelques chercheurs.

Tableau 2.3. Comparaison des résultats de la ténacité (K_{IC}) avec la littérature [54].

calculs de K _{IC} basés sur	Béton	BAP4	BAP5	BV4
	fc _{28,cyl} (MPa.m ^{1/2})	53,9 ± 7,9	65,0 ± 8,3	53,4 ± 2,3
* l'Approche de Hillerborg	KIC (MPa.m ^{1/2})	3,85	4,21	4,54
* l'Approche de Anderson	KIC (Mpa.m ^{1/2})	1,23	1,43	1,78
* l'étude actuelle (Eq.4, 6,7 et 8)	fc _{28,cyl} (MPa)	54,3 ± 2,2	61,7 ± 3,0	53,6 ± 1,6
	KIC (MPa)	2,71	2,87	2,49

Il est observé à travers cette recherche [55], que K_{IC} et G_{IC} diminuent alors que le rapport E/Léq augmente. Cela est dû à la réduction de la fragilité du béton avec des rapports E/Léq plus élevés.

Une autre étude sur les bétons à ultra hautes performances [56] a montré par des tests d'indentation que le module d'élasticité du béton est en relation avec le volume d'air contenu dans la matrice cimentaire. Elle considère que le BUHP est un matériau composite à quatre phases.

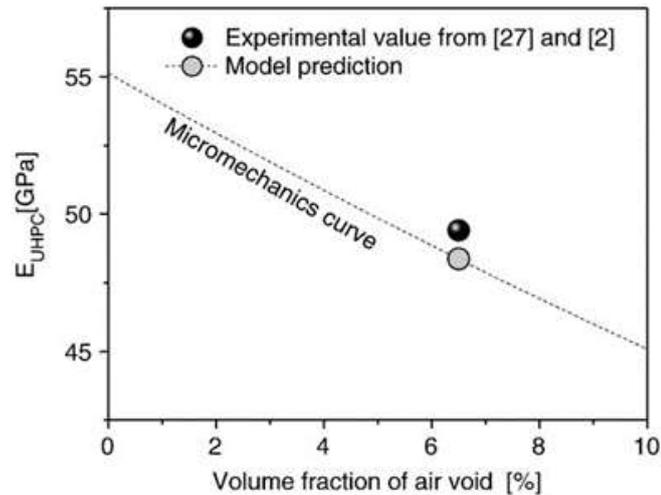


Figure 12. Relation entre le Module E et le volume de l’air dans le béton BUHP
Corrélation par test d’indentation [55]

On constate que le test d’indentation donne un modèle correcte de prédiction des performances mécaniques du béton BUHP, l’augmentation du pourcentage des vides dans la matrice cimentaire fait diminuer le module d’élasticité du béton.

Comme le béton est un matériau composite constitué d’une matrice cimentaire et des agrégats, la phase de transition représente une zone sensible, et elle peut influencer sur le comportement mécanique du mélange, une étude visant de cibler l’effet de cette zone sur le comportement mécanique du béton [56]. Dans cette étude on constate que la zone de transition a un rôle important sur les propriétés mécaniques du béton.

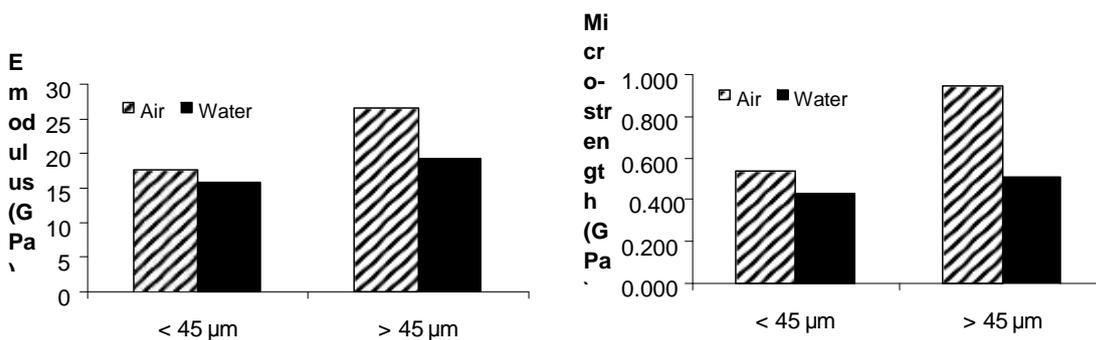


Figure 13. Module d’élasticité et micro dureté de l’ITZ et de la matrice pour le béton coulé dans l’air et dans l’eau [56].

On constate **Figure 13** que la moyenne du module élastique et de la micro dureté de l’ITZ < 45 μm du béton coulé dans l’air étaient respectivement inférieurs de 50 % et 76 % à ceux de

l'ITZ > 45 µm. Ceci peut être attribué à la faiblesse de l'ITZ la plus proche du granulat. De même, pour le béton coulé dans l'eau, la différence des propriétés de l'ITZ était environ 20% plus élevée dans la matrice en vrac (> 45 µm).

Les résultats ont également indiqué que dans la ZIT, les valeurs E et H étaient 10~25% plus élevées pour le béton coulé dans l'air que pour le béton coulé dans l'eau. Dans la matrice en vrac, la différence semble être plus importante, les valeurs E et H étant 40~80% plus élevées pour le béton coulé dans l'air. Cela semble suggérer que la ZIT autour du granulat grossier était moins affectée que la matrice de pâte en vrac pour le béton coulé dans l'eau.

Malgré la diversité des études et modèles présentés, cet axe de recherche reste loin d'être abordé d'une manière irrévocable, ceci est due à la complexité du sujet d'une part, et à la nouveauté du matériel adapté aux essais sur les bétons d'une autre part.

7.3 Exposé des résultats numériques de l'équipe de recherche :

Depuis trois ans, dans l'université de BBA, un axe de recherche été entamé, l'objectif est l'étude des propriétés mécaniques des bétons par les tests d'indentation, on présente par la suite les principaux résultats pour la détermination d'une corrélation.

Tableau 2.4. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton ordinaire [52]

Charges P (N)	Module d'élasticité du béton ordinaire E (GPa)	Résistance du béton à 7 jours R _{c7} (MPa)
30	38.2	30,36
50	44.5	
100	47.4	

Tableau 2.5. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton autoplacant [52]

Charges P (N)	Module d'élasticité du béton autoplacant E (GPa)	Résistance du béton à 7 jours R_{c7} (MPa)
30	39.2	41,26
50	44.8	
100	52	

Tableau 2.6. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton autoplacant BAP 25 [53]

Charges P (N)	Module d'élasticité du béton autoplacant E (GPa)
5	40,0
10	56,2
15	31,4
20	37,0

Tableau 2.7. Module E obtenu durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performance [52]

Charges P (N)	Module d'élasticité du béton à hautes performances E (GPa)	Résistance du béton à 7 jours R_{c7} (MPa)
30	51.3	47,75
50	61.3	
100	48.4	

7.4 Corrélation et étude comparative :

Nous présentons dans cette section une étude de corrélation entre les différents paramètres afin de caractériser les propriétés mécanique des différents bétons par les tests d'indentation.

La résistance des bétons a été déterminée par les essais classiques d'écrasement, le module d'élasticité par les tests d'indentation, la relation entre ces deux paramètres donne les résultats suivants :

Tableau 2.8. Relation entre la résistance à la compression et le module E.

Résistance à la compression du béton R_{c7} (MPa)	Valeurs moyenne des Modules d'élasticité E (GPa)
30,36	43,37
41,26	45,33
47,75	53,67

La corrélation entre les deux paramètres donne le graphisme suivant (Figure 14).

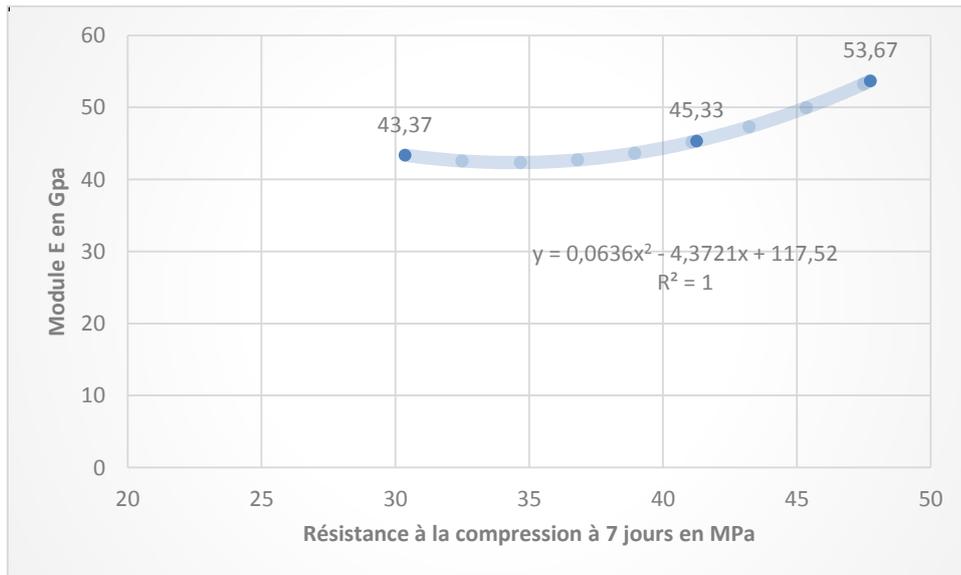


Figure 14. Relation entre la résistance du béton à la compression et le module E déterminé par indentation.

Quant aux différentes charges appliquées au moment de l'essai d'indentation, plusieurs valeurs du module d'élasticité s'affichent, le tableau suivant (Tableau 3.9) donne les résultats disponibles.

Tableau 2.9. Module d'élasticité des bétons testés en fonction de la charge d'indentation P.

Charge P en N	Module E en GPa
30	38,2
50	44,5
100	47,4
30	39,2
50	44,8
100	52
5	40
10	56,2
15	31,4
20	37
30	51,3
50	61,3
100	48,4

La corrélation entre les deux paramètres est donnée dans le graphisme suivant (figure 15) :

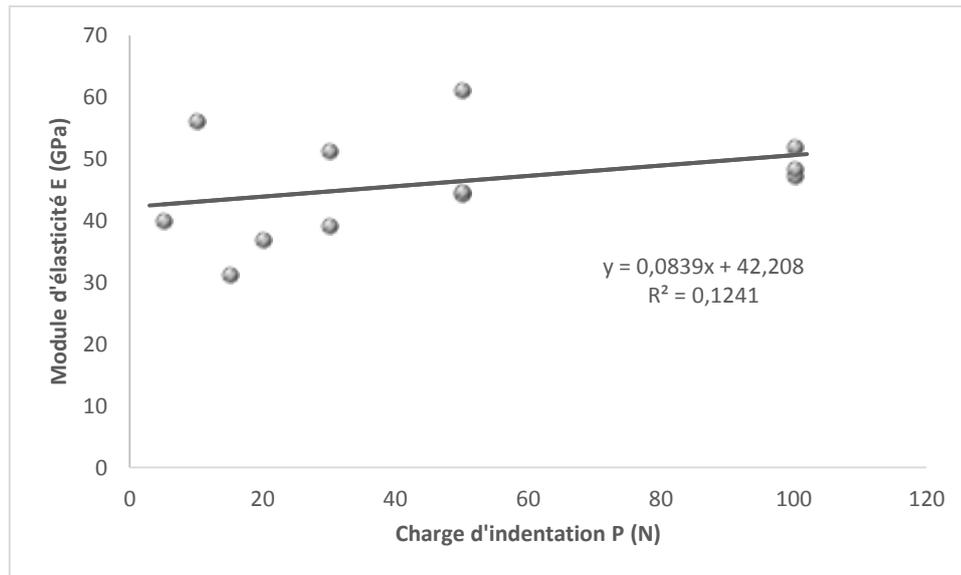


Figure 15 Influence de la charge P d'indentation sur le module E.

7.5 Interprétation des résultats :

La figure 15 présente la relation entre la résistance du béton à la compression déterminée par les essais classiques d'écrasement et le module E déterminé par test d'indentation. Cette fonction montre que si la résistance du béton augmente, le module E augmente aussi suivant une loi non linéaire de forme polynôme, la corrélation est très satisfaisante (le coefficient de détermination $R^2 = 1$). Ce comportement non linéaire explique que d'autres paramètres peuvent intervenir en interaction pour donner cette réponse.

La résistance du béton des classes étudiées varie de 20 à 50 MPa, ce qui donne une variation du E entre 40 et 60 GPa, cet intervalle correspond avec une bonne approximation aux limites déterminées par des études antérieures.

On peut déclarer que ce modèle présente une approche plus réaliste donnant le comportement mécanique de trois classes de bétons au même temps.

La figure 3.11 illustre le comportement mécanique des bétons (Module E) en fonction du niveau de chargement d'indentation P, on constate une dispersion des résultats (R^2 est faible), avec une allure droite ascendante, la courbe de tendance est purement linéaire. On pense avoir une meilleure approximation en augmentant le nombre de points d'études.

Malgré la dispersion des résultats, on peut avancer les conclusions préliminaires suivantes :

- ✓ Si la charge P augmente, la valeur de E augment.
- ✓ Avec un nuage dense de points de tests, on peut construire un fuseau représentant cette fonction.

- ✓ A travers ce graphisme, on peut identifier le niveau de chargement P qui peut donner un résultat fiable du module d'élasticité E .

En conclusion, les modèles de corrélation proposés (figures 15 et 16) présentent une démarche satisfaisante pour l'estimation directe des propriétés mécaniques des bétons. Il est à signaler que les classes de bétons étudiées peuvent représenter la plupart des familles des bétons utilisés dans le Génie Civil, ce qui donne à ces modèles un caractère plus général.

8. Conclusion :

Nous avons montré à travers cette étude de corrélation l'interaction entre les essais classiques de caractérisation mécanique des bétons et l'utilisation de la technique d'indentation. La corrélation présentée s'est avérée intéressante, et elle peut décrire le comportement des bétons, et donner des résultats satisfaisants.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion général

Nous avons étudié dans ce travail la possibilité de caractérisation mécanique des bétons par les tests d'indentation, utilisés la rgement dans le domaine de mécanique, l'objectif et trouver une relation entre ces deux techniques par corrélation.

Le travail réalisé sur trois familles de bétons (BO, BAP et BHP) montre l'efficacité de la procédure et démarche proposée, les résultats obtenus indiquent la concordance entre l'approche purement mécanique (indentation) et l'approche classique de Génie Civil.

Les modèles de corrélation proposés dans le présent travail présentent une démarche satisfaisante pour l'estimation directe des propriétés mécaniques des bétons. Il est à signaler que les classes de bétons étudiées peuvent représenter la plupart des familles des bétons utilisés dans le Génie Civil, ce qui donne à ces modèles un caractère plus général.

Nous pouvons déclarer que ce travail mérite d'être enrichi par une investigation plus étendue, en lui ajoutant d'autres familles de bétons (béton de fibre, béton de sable, BCR, ...).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] ZAIDI S. et LABADLIA K. « l'influence des adjuvants sur la composition des bétons autobloquants », mémoire de master, Université 08 MAI 1945 Guelma, Juin 2016
- [03] RACHIL.L, DENDANI.M, «Influence des différentes granulométries des agrégats sur le comportement mécanique du béton ordinaire». Mémoire de master. Université De M'hamed Bougara -Boumerdes, 2016.
- [02] Site Web universailis [<https://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/1-histoire-du-beton/>]
- [04] DREUX, J. : « Nouveau guide de béton et de ses constituants » 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [05] Khayat K., «Les bétons auto nivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation p 479-483, Eyrolles
- [06] Mme Ben akili Sarah, «caractérisation expérimental des bétons auto plaçant obtenus par ajout des déchets de construction », thèse de magister université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009
- [07] Benaddad .S, Benatsou. N, «Etude à la compression d'un Béton auto plaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires) ». Mémoire de master. Université d'Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- [08] CIM béton, 2000. Construire avec les bétons, Ed du Moniteur.
- [09] Les bétons hautes et très hautes performances, 2p.Disponible sur:
<http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances/beton-hautesperformances-bhp>
- [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] [wikipedia.org/wiki/Indentation_\(mat%C3%A9riau\)](http://wikipedia.org/wiki/Indentation_(mat%C3%A9riau)).
- [12] 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] 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.
- [13] 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.
- [14] GD. Quinn, RC. Bradt, " On the Vickers indentation fracture toughness test," J. A. Cer.Soc, Vol.90, pp.673-680,
- [15] R.Morrell, "Fracture toughness testing for advanced technical ceramics: internationally agreed good practice," A. Ap. Cer, Vol.105, pp.88-89, 2006.
- [17] S.Palmqvist, "A method to determine the toughness of brittle materials, especially hard materials," Jernkontorets. Ann. Vol.141, p.303, 1957.
- [18] B.R.Lawn, M.V. Swain, "Micro fracture beneath point indentations in brittle solids," J. Mat.Sci, Vol.10: pp.113,
- [19] BR.Lawn, DB.Marshall, "Hardness, toughness and brittleness indentation analysis," J. A .Cer .Soc, Vol.62, pp.347-50, 1979.
- [20] A.G. Evans, T.R. Wilshaw, "Quasi-static solid particle damage in brittle solids,"Acta Metall, Vol.24, pp.939, .
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23]A. AbdessamadTHÈSEde doctorat , université paris-est , Spécialité : Génie Civil Sujet de la thèse : Bétons de granulats de bois : Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo-hydro-mécaniques par des approches multi-échelles]
- [24] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002
- [25] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002.

- [26] SAMOUH. H, ROZIERE.E, LOUKILI.A, «Interprétation des mesures du retrait de dessiccation des bétons autoplaçants (BAP) ». XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin
- [27] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants –Recommandations provisoires, p 63, Juillet 2002. 2012.
- [28] E. Barthel, D. Chicot, J.P. Guin, E. Le Bourhis, G. Mauvoisin
- [29] J. Brinell, “Mémoire sur les épreuves à bille en acier,” Presented at the Congrès International des Méthodes d'Essai des Matériaux de Construction, Paris, p. 83-94, 1901.
- [30] D. Tabor, “The Hardness of Metals,” Clarendon Press Oxford, 1951.
- [31] D. François, ‘Essais mécaniques des métaux : Essais de dureté,’ Technique de l’ingénieur.
- [32] P. Kempe, ‘Nano indentation et micro rayage en environnement contrôlé Colloque, SF2M Section-Ouest,’ Surfaces et Interfaces, indentation, rayage et abrasion, Angers, 16 et 17 mars 2005.[]
- [33] Y. T. Cheng, C.M. Cheng, ‘Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation,’ *Ap.phy. Let*, Vol.73, N°.5, p.614, 1998.
- [34] P.L.Larsson, A.E.Giannakopoulos, E.Söderlund, D.J.Rowcliffe., R. Vestergaard, ‘Analysis of Berkovich Indentation,’ *Int. Jour. Solids Structures*, Vol. 33, N°.2, pp. 221- 248, 1996.
- [35] JR. Tuck, AM. Korsunsky, SJ. Bull, R. Davidson, ‘On the application of the work-of-indentation approach to depth-sensing indentation,’ *Surface and coatings technology*, Vol.137,N°.2, pp.217-224, 2001.
- [36] M.R. Vankandingham, “Review of instrumented indentation,” *Jour .Res . Nat.Ins.Stand.Tech.*, Vol.108, N°.4, pp.249-265, 2003
- [37] D.R. Clarke, R. Tandon, “Factors affecting the fracture resistance of silicon nitride ceramics,” *Mater. Sci. Eng., A* 195, p.207, 1995.
- [38] M.R. Vankandingham, ‘Review of instrumented indentation,’ *Jour .Res.Nat.Ins.Stand.Tech.* Vol.108, N°.4, pp.249-265, 2003.
- [39] 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.
- [40] G.M. Pharr, ‘Measurement of mechanical properties by ultra-load indentation,’ *Mater.Sci.Eng., A* 253 (1-2), p.151, 1998.
- [41] 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.
- [42] B.Cédric, ‘Indentation et rhéologie de verres inorganique de 20 à 700°C,’ Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 2006
- [43] G.A.Gogotsi, ‘Criteria of fracture (edge chipping and fracture toughness tests),’ *Ceram. Int*, Vol.39, pp.3293-3300, 2012
- [44] C.B.Ponton, R.D.Rawlings, ‘Vickers indentation fracture toughness test Part 1: Review of literature and formulation of standardized indentation toughness equations,’ *Mater. Sci. Tech.*, 5:pp.865–872, 1989.
- [45] C.B.Ponton, R.D.Rawlings, ‘Vickers indentation fracture toughness test Part 2: Application and critical evaluation of standardized indentation toughness equations,’ *Mater. Sci. Tech.*, Vol.5,pp.961–976, 1989.
- [46] K.K.Bamzai, P.N.Kotru, ‘Fracture mechanics, cracks propagation and micro hardness studies on flux grown ErAlO₃, single crystals,’ *Mater. Sci. Tech.*, Vol.16, pp.405-410, 2000.
- [47] D.G. Bhat, ‘Comment on elastic/plastic indentation damage in ceramics: The median/radial crack system,’ *J. A,Cer, Soc*, Vol.64, C165-C-166, 1981.
- [48] NF ISO 14577-1 “Metallic materials instrumented indentation test for hardness and other materials parameters”, part 1, Test method, pdf, 2003.
- [49] NF ISO 14577-2 “Metallic materials instrumented indentation test for hardness and other materials parameters”, part 2, Verification and calibration of testing machine, pdf, 2003.

- [50] NF ISO 14577-4 “Metallic materials instrumented indentation test for hardness and other materials parameters, part 1, Test method for metallic and non-metallic coating, pdf, 2003.
- [51] NF ISO 14577-3 “Metallic materials instrumented indentation test for hardness and other materials
- [52] Guittoum N. et Djelled Dj., « Détermination des propriétés mécaniques du béton à partir d’un test d’indentation classique : Application sur les BO, BAP et BHP », Mémoire de Master, Université de BBA, Juin 2022.
- [53] ZAIDI H. et SAADOUNE L., « Caractérisation mécanique d’un béton auto plaçant à partir d’un essai d’indentation », Mémoire de Master, Université de BBA, Juin 2020.
- [54] GRAIRIA S. “de formations différées, ténacité et adhérence des bétons auto placants à hautes performances”, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de 8 Mai 1945 de Guelma, 2018.
- [55] Luca S et al, « The nano-mechanical signature of Ultra High Performance Concrete by statistical nano indentation techniques », Cement and Concrete Research 38 (2008) 1447–1456.
- [56] Mohammed Sonebi, « utilization of micro-indentation technique to determine the micro mechanical properties of itz in cementations materials », Proceedings of ACI Session on “Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives” November 7, 2006, Denver, USA.