

REPUBLICQUE 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 de Génie Mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

Le diplôme de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie des Matériaux

Elaboré par :

- Guittoum Nedjmeddine
- Djelled Djamel Eddine

Intitulé

**Détermination des propriétés mécaniques du béton à partir d'un test
d'indentation classique : Application sur BO,BAP et BHP**

Soutenu le : 30/06/2022

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M.Rouabah Zahir	Prof	Président	Univ-BBA
M.Bentoumi Mohamed	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M.Logzit Nacer	MCB	Co-Encadreur	Univ-BBA
M.Ziani Hocine	MCB	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes encadreurs de mémoire, Mr Bentoumi Mohamed et Mr Logzit Nacer nous les remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

je dédie ce travail à :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Généralités sur le BO,BAP,BHP

1.1 Historique 3

1.2 Définition de béton 3

1.3 Béton ordinaire..... 4

1.3.1 domaine d'utilisation des BO 4

1.3.2 avantages et inconvénients des BO 4

1.4 Définition de béton autoplaçant5

1.4.1 Domaine d'utilisation des BAP 5

1.4.2 Avantages et inconvénients des BAP6

1.4.3 Principaux constituants des BAP 6

1.4.4 différence entre le BO et BAP9

1.5 Béton à hautes performances9

1.5.1 Composants des bétons à très hautes performances10

1.5.2 Caractéristiques des BHP11

1.5.3 Avantages des BHP14

1.5.4 Domaines d'application des BHP15

1.5.5 Exemples d'application du BHP16

1.6 Conclusion17

Chapitre 2 : indentation

2.1 Introduction	18
2.2 Caractéristiques mécaniques des matériaux	19
2.3 Techniques d'indentation	19
2.3.1 Principe.....	19
2.3.2 Indentation conventionnelle	20
2.4 Indentation instrumentée	25
2.4.1 Définition	25
2.4.2 Technique et analyse	25
2.4.3 Phases durant l'essai d'indentation	26
2.5 Caractérisation de la ténacité K_{Ic} par indentation	26
2.5.1 introduction	26
2.6 Conclusion	28

Chapitre 3 : Partie expérimentale

3.1 Introduction	29
3.2 Formulation des bétons	29
3.2.1 Préparation des échantillons	29
3.3 rodage et polissage	31
3.4 Essais mécaniques	32
3.4.1 Essai de compression	32
3.4.2 Technique d'indentation	33
3.4.3 essai d'indentation.....	34
3.5 Résultats et discussions	36
3.6 conclusion.....	37

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Généralités sur les BO,BAP,BHP

Tableau 1.1 : classement des béton selon leur résistance à la compression..... 13

Chapitre 2 : indentation

Tableau 2.1 : Principe et nombres de dureté des principaux essais de dureté par pénétration 25

Chapitre 3 : partie expérimentale

Tableau 3.1 résultats des essais de compression sur les éprouvettes 16/32 pour chaque type de béton33

Tableau 3.2 Les grandeurs de E, HV, a, L et C obtenus durant chaque essai d'indentation du béton ordinaire34

Tableau 3.3 Les grandeurs de E, HV, a, L et C obtenus durant chaque essai d'indentation du béton autoplaçant35

Tableau 3.4 Les grandeurs de E, HV, a, L et C obtenus durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performances35

Tableau 3.5: Equations utilisées pour le calcul des paramètres36

Tableau 3.6: Valeurs moyennes de la ténacité, du Module d' Young et de la dureté Vickers des des échantillons utilisés36

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les BO,BAP,BHP

Fig 1.1 comparaison de la structure d'un BO et BAP9

Fig 1.2 Porosité des bétons ordinaires et des BHP12

Fig 1.3 Pacific Tower16

Fig 1.4 grande de la défense (paris)16

Fig 1.5 Pont de l'île de Ré16

Fig 1.6 Poteau des tours Coeur défense16

Chapitre 2 : indentation

Fig 2.1 Schéma représente le principe de la dureté de Brinell	20
Fig 2.2 Schéma du principe de la dureté de Vickers	21
Figure 2.3 : Schéma du principe de la dureté de Rockwell HRC	22
Fig 2.4 Schéma du principe de la dureté de Rockwell HRB	23
Fig 2.5 Schéma du principe de la dureté de Knoop HK	23
Fig 2.6 Schéma représentatif la dureté Berkovich avec ses angles caractéristiques et des exemples d'empreinte pyramidale sous différentes charges	24
Fig 2.7 Représentation schématique des systèmes de fissures induits par indentation Vickers	27

Chapitre 3 : partie expérimentale

Fig 3.1 Eprouvette cylindrique 16/32	31
Fig 3.2 Principe de rodage et polissage du matériau par une polisseuse Struers.....	31
Fig 3.3 : Polissage du BO,BAP,BHP auto plaçant par des papiers abrasifs.....	32
Fig 3.4 essai de compression avec machine "BeraTest AG"	32
Fig 3.5 Machine d'indentation Qness 30.....	33
Fig 3.6 empreinte obtenue après essai d'indentation	34
Fig 3.7 la variation de module du young E en fonction de la charge P pour les bétons (BO30,BAP30,BHP50)	36
Fig 3.8 Variation de la dureté Hv en fonction de la charge P sur les bétons (BO30,BAP30,BHP50)	36
Figure 3.9 la Variation de la la longueur de fissuration C en fonction de la charge P sur les bétons (BO30,BAP30,BHP50).....	36

Liste des abréviations

BO	Béton ordinaire
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton à hautes perforamances
E	Module de Young
H	Dureté
Kic	Facteur d'intensité de contrainte
Rm	Résistance mécanique
HV	Dureté vickers
HB	Dureté de brinell
HR	Dureté de Rockwell
HK	Dureté de knoop
SP	Superplastifiant
Fs	Fumée de silice
C	Longueur de fissure
a	Taille de l'empreinte

Introduction générale

Ces dernières années, les innovations techniques dans l'industrie de la construction ont progressé considérablement et la recherche et le développement des matériaux de construction de hautes performances ont suivis activement pour faire face aux innovations.

Parmi les matériaux qui ont vu un développement considérable, on trouve le béton. Le concepteur, le constructeur et le chargé de la maintenance d'un ouvrage doivent savoir parfaitement les propriétés physiques, mécaniques et hydriques des matériaux qui sont à leur disposition. Ceci permettrait de faire bon choix pour obtenir des constructions rigides, efficaces, économiques et durables.

Les matériaux de construction et spécialement le béton sont des solides utilisés non seulement pour construire des maisons, des ouvrages, ou encore aménager son environnement (équipement collectif, routes, ponts, aménagements urbains).

Bien qu'un grand nombre de matériaux soit connu depuis fort longtemps, leur étude a débuté très tard, car l'homme a disposé rapidement d'une grande variété de substances pour tous ses besoins courants, sans avoir à entreprendre de recherches approfondies. Ainsi il n'a utilisé, au début, que la pierre, l'argile, la chaux, le plâtre et les matériaux biologiques naturels: bois, laine, fourrures, cuir, lin, etc.

L'un des grands tournants a sans doute été le moment où le comportement d'un matériau dépendent à la fois de l'arrangement des atomes qui les constituent, des imperfections qu'on y rencontre et des forces interatomiques. Toutes les propriétés macroscopiques peuvent être interprétées à partir des arrangements atomiques et des structures moléculaires caractérisées par leur type de liaison.

L'ingénieur qui est chargé de concevoir, construire et maintenir un ouvrage doit savoir parfaitement les différentes propriétés des matériaux qui sont à sa disposition. Ceci lui permet de faire son choix pour obtenir des constructions rigides, efficaces, économiques et durables. L'apport expérimental est fondamental pour définir les propriétés au moyen d'essais. Il est nécessaire pour vérifier des hypothèses de calcul par des essais sur maquettes, éprouvettes, etc...

Traditionnellement, les matériaux ont été classés en métaux, céramiques, verres, textiles, polymères et matériaux composites, compte tenu à la fois de certaines propriétés caractéristiques, des méthodes d'obtention et de leur destination industrielle. Chacune de ces grandes divisions avait sa propre nomenclature, sa méthodologie, ses normes, de sorte que les comparaisons entre les divers matériaux étaient souvent difficiles.

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 béton après chaque test d'indentation, la forme du béton doit être plate et convenablement poli.

En effet, 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 hystérésis, observées sur la courbe charge - déplacement quand l'essai est instrumenté.

Notre objectif consiste en premier lieu, à préparer l'échantillon et procéder au processus de fabrication de surface.

En second lieu, nous présentons les résultats comparatifs obtenus lors de l'estimation du facteur d'intensité de contrainte (Ténacité), K_{Ic} , la dureté H et le module du young E calculé à l'aide de différentes relations établies.

Chapitre 1

**Généralités sur les
BO, BAP et BHP**

1.1 Historique

L'usage du béton remonte à la haute Antiquité (3 000 à 700 avant J.-C.), avec les mélanges à base d'argile en Mésopotamie notamment. Mais ce matériau se dégradant rapidement, peu de vestiges attestent son utilisation.

Au XIXe siècle, grâce à l'industrialisation de la fabrication du ciment, de nombreuses avancées successives assurent le succès du béton. Un jardinier créatif, Joseph Monier (1823-1906) dépose, entre 1867 et 1891, plusieurs brevets décrivant un système de construction à base de fer et de ciment, destiné à fabriquer des jardinières, tuyaux et réservoirs à eau. Il est l'inventeur du « ciment armé ».

Les brevets se succèdent. En 1867, un immeuble en béton aggloméré est breveté à Paris par François Hennebique (1842-1921). Celui-ci imagine ensuite la première dalle en béton de ciment armé de fersronds (1880), les poutres creuses en béton armé (1892), le pilote en béton armé à ligatures rapprochées (1896)...[1]

1.2 Définition de béton

le béton est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, gravillons, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), Mêlé à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », c'est-à-dire qu'il se solidifie.[2]

Le béton un matériau omniprésent aujourd'hui, tant dans le monde de la construction que dans d'autres domaines. A la fois économique et facilement manipulable, il répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité et sa résistance font de lui un matériau incontournable dans le domaine de la construction. Sa composition peut être variable, ce qui permet d'obtenir un béton répondant à des besoins spécifiques.[3]

1.3 Béton ordinaire

Cet béton est réalisé à partir de ciment (résultat de la cuisson d'un mélange d'environ 70% de calcaire et 30% d'argile avec quelques additions dont du gypse), eau et granulats. Le béton moulé lors de sa mise en œuvre, acquiert ses propriétés en se durcissant au cours du temps. Il est donc constitué de granulats et d'une pâte de ciment durcie dont les propriétés dépendent de sa formulation.

La formulation des bétons relève de critères techniques, normatifs et aussi économiques comme les caractéristiques géométriques de l'ouvrage et son environnement durant son fonctionnement, les caractéristiques du béton lors de sa mise en œuvre et durci, les conditions de production et de mise en œuvre du béton, les matériaux disponibles localement, les normes en vigueur, ... Cette ressource s'attache dans un premier temps à présenter la démarche afin de formuler un béton ordinaire.[4]

1.3.1 domaine d'utilisation des BO

L'utilisation la plus courante du béton dans les constructions est le *béton armé*. Celui-ci est utilisé pour la construction de bâtiments, d'usines, de réservoirs et de silos de petite capacité, de ponts de petite portée, de routes, d'ouvrages de fondation...

Dans ce matériau, les armatures métalliques reprennent les efforts de traction, apportent la ductilité (déformations importantes avant rupture) et le béton reprend les efforts de compression et protège les armatures de la corrosion. Sa partie supérieure est soumise à de la compression et sa partie inférieure à de la traction. Les armatures de flexion sont donc placées dans le bas de la poutre.[5]

1.3.2 avantages et inconvénients des BO :

Les bétons ordinaires BO présentent de nombreux avantages, on cite :

- Est plus pratique et plus maniable que le béton classique;
- Permet à la fois, une bonne isolation thermique et phonique;
- Est facile à mettre en place;
- Est non inflammable et supporte le clouage; Permet de réaliser des économies.[6]

Inconvénients de béton ordinaire :

du fait de son poids faible, présente quelques défaillances techniques:

- Les propriétés mécaniques: la résistance du béton, à la compression, est réduite ce qui amenuise son champ d'utilisation.
- Le béton ordinaire présente des insuffisances manutentionnelles (transport par camion tapis ou camion pompe). Le pompage est facile à réaliser à cause de la faible masse, mais nécessite l'utilisation de technologies avancées.[6]

1.4 Définition de béton autoplaçant

Le béton autoplaçant est un béton qui utilise un rapport eau/ciment assez fluide et élevé pour permettre un parfait nivellement de la quantité de ciment. Certains types de béton autoplaçant recourent à des super-plastifiants pour une parfaite pénétration du béton. Il ne ressemble à aucune autre forme de béton, sinon au béton autonivelant qui ne doit être utilisé que pour les surfaces horizontales.[7]

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 ferraillements denses. [8]

1.4.1 Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [8]. 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 oeuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- Densités de ferraillement 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.

1.4.2 Avantages et inconvénients des BAP

Le béton autoplaçant a décidément bien plus d'avantages que d'inconvénients lorsqu'on le compare par exemple au béton traditionnel. Les avantages majeurs pour ce béton sont donc les suivants :

- Il est facile à mettre en œuvre en plus de sa rapidité d'autoétalage ;
- Il ne nécessite pas l'emploi de matériel de vibration ;
- Il réussit à remplir les coffrages ;
- Sa surface est plane et demeure régulière, sans autre besoin de méthodes de nivellement ;
- Il permet un bétonnage de formes diverses, positionné à la verticale ou à l'horizontale, tout en étant adapté aux constructions peu accessibles ou contenant beaucoup de fer.[7]

Inconvénients de BAP :

quant aux désavantages, ils concernent principalement la taille du projet. Le béton autonivelant est plus pratique pour les réparations de petites surfaces et la préparation d'un plancher que pour l'installation d'une nouvelle dalle de béton.[9]

1.4.3 Principaux constituants des BAP

Les constituants des BAP peuvent être assez différents de ceux des BO. Ils peuvent différer tant par leurs proportions que par leur choix. Généralement, on peut diviser les constituants entrant dans la fabrication du BAP, selon leur utilisation, en trois catégories ; les matériaux de base (ciment, granulats et eau de gâchage), les additions minérales, ainsi que les adjuvants chimiques [10].

1.4.3.1 Matériaux de base

Les granulats, le ciment et l'eau forment les éléments de base de tous types de béton. Ils sont qualifiés ainsi puisqu'ils sont historiquement les seuls constituants des bétons.

a) Les granulats :

Le choix des granulats pour les BAP est très important. Il s'agit en fait de déterminer leur granulométrie permettant de minimiser le plus possible le volume d'air dans le but d'améliorer les propriétés du béton. Les granulats se divisent principalement en deux catégories soient les gravillons ($\Phi > 5\text{mm}$) et le sable ($\Phi \leq 5\text{mm}$).

Dans le cas des BAP, les gravillons sont essentiellement caractérisés par leur dimension maximale, cette dimension étant principalement limitée à 20 mm afin d'empêcher le risque de blocage lors de la mise en place. Les gravillons roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. En outre, le sable recommandé à la confection des BAP doit comporter des quantités assez fortes d'éléments fins ($\Phi \geq 0.125\text{mm}$), dans la plage de 4 à 8 %. Ainsi, ses grains passants au tamis de 2 mm doivent être compris entre 38 et 42 %. [11]

b) Le ciment :

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

c) L'eau de gâchage :

Pour convenir à la confection de BAP, l'eau de gâchage ne doit contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles. À cet effet, une analyse chimique de l'eau non potable peut être nécessaire pour détecter toute teneur trop élevée en ces impuretés.

1.4.3.2 Les additions minérales

Nous présentons ci dessous les différentes additions minérales qu'on peut incorporer dans les compositions des BAP [9] :

a) Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires, matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , sont obtenus par broyage ou par pulvérisation des roches calcaires naturelles ou non. Ils sont généralement considérés comme une addition inerte, mais le fait qu'ils présentent certaines propriétés hydrauliques n'est pas en soi désavantageux, de même que s'ils présentent une réaction avec certains composés développés au cours de l'hydratation. [12]

Les fillers calcaires présentent une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieur à 75 % en masse.[13]

b) La fumée de silice :

est un sous-produit de l'industrie des alliages de silicium et notamment Ferro silicium récupérée dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication de ces produits. Elle se présente sous forme de particules sphériques plus ou moins grisâtres et extrêmement fines dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0.1 μm (100 fois plus petits que ceux du ciment)[13]. Sa composition chimique doit contenir au moins 85 % de dioxyde de silicium SiO_2 .

1.4.3.3 Les Adjuvants chimiques

sont des agents organiques ou inorganiques qui incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en oeuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de liant, provoquent des modifications de certaines propriétés de la rhéologie et les propriétés mécaniques.

a) Super-plastifiants :

La fluidité des bétons autoplaçants est obtenue en ajoutant des super-plastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres type de béton.

Les super- plastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fillers en

S'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau.[14]

b) Autres additions :

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées :

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres d'acier comme armature constructive
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu
- les fibres de polyéthylène ne (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait

Plastique.

1.4.4 différence entre le BO et BAP

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

C'est donc principalement l'ajout d'une addition minérale qui sert de substitut aux gravillons. Cependant, cette formulation n'est pas suffisante pour atteindre la fluidité, il est donc nécessaire d'ajouter aux BAP un défloculant (super plastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

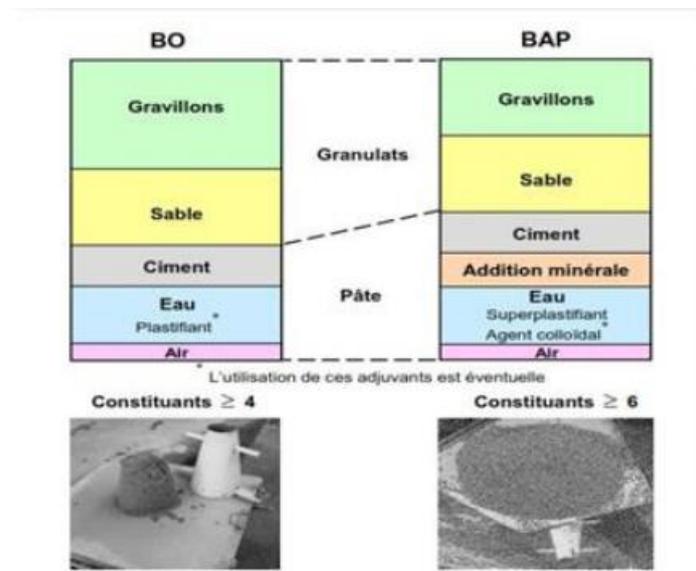


Fig 1.1 comparaison de la structure d'un BO et BAP [10]

1.5 Béton à hautes performances

Un béton à hautes performances (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.

Le béton à hautes performances est apparu à la fin des années 1980. [15]

1.5.1 Composants des bétons à très hautes performances

1.5.1.1 Les granulats

Les granulats (environ 70% du volume) constituent le squelette granulaire du béton, et participent pour une grande part à la résistance mécanique. Le granulat choisi doit être très résistant à l'écrasement.

Un des paramètres essentiels dans la formulation des BHP est la compacité du mélange granulaire. La compacité se définit comme le rapport du volume des inclusions (sables, granulats) sur le volume total. [16]

1.5.1.2 Ciment

Les ciments classiques utilisés dans la construction sont composés principalement de Clinker (mélange de calcaire et d'argile broyé et chauffé à 1750°C), de gypse, et de divers ajouts utilisés pour donner des caractéristiques particulières aux bétons. Tous les ciments ne sont pas adaptés pour la réalisation d'un Béton à Très Hautes Performances. Le choix est complexe ; il fait intervenir les aspects rhéologique et mécanique.[16]

1.5.1.3 Le fluidifiant

L'eau est destinée à l'hydratation du ciment anhydre. En effet, lors de leurs contacts avec l'eau, les particules de ciment ont tendance à former des flocculats entraînant une perte de maniabilité. L'eau de gâchage joue alors le rôle du lubrifiant.

L'amélioration des propriétés mécaniques et de la tenue à long terme des bétons passe donc par la diminution (voire la suppression) de cette eau de gâchage.

Les premiers composés utilisés pour lutter contre la floculation du ciment étaient les réducteurs d'eau. Les réducteurs d'eau neutralisent les charges électriques à la surface des grains de ciment.

Ces réducteurs d'eau ne donnant pas entière satisfaction, on introduisit des produits de synthèse plus performants : Les superplastifiants, ou supers réducteurs d'eau. Ils peuvent réduire de 30% le dosage en eau, nous ramenant à des dosage E/C de l'ordre de 0,3 (dosage minimum pour une hydratation complète des grains de ciments).

1.5.1.4 Les ultrafines

Le choix des ultrafines permettant l'élaboration de béton à très hautes performances est vaste. la fumée de silice (fs) qui est l'ultrafine la plus couramment utilisée.

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium. Elle provient de l'oxydation des gaz dégagés lors de la cuisson à très haute température d'un mélange quartzhouille-copeaux de bois. Elle est composée de silice (SiO_2), d'oxydes métalliques, d'alcalins et de déchets de carbone.

La qualité de la fumée de silice est variable selon le lieu d'approvisionnement. Elle est surtout fonction de sa teneur en carbone, produit de la combustion des copeaux de bois. La présence du carbone entraîne des effets rhéologiques néfastes (impureté qui peut entraîner de la porosité ; retardateur de prise). La couleur de cette ultrafine est un bon indicateur de son dosage en carbone : la teinte varie du blanc cassé (0, 1% de carbone) jusqu'au noir (4% de carbone).

Les fumées de silice ont un double rôle :

- Un rôle physique (rôle granulométrique)
- Un rôle physico-chimique (rôle de liant).[16]

1.5.2 Caractéristiques des BHP

1.5.2.1 Caractéristiques physiques

Ouvrabilité

L'ouvrabilité du béton dépend de plusieurs facteurs :

- type et quantité de ciment.
- type et quantité de sable.
- teneur en eau.
- aspect et grosseur des agrégats.

La fluidité du mélange de béton croît avec l'augmentation de la quantité d'eau. Le mortier de ciment, non seulement remplit les vides et enrobe les grains des agrégats, mais les écarte également les uns des autres.[17]

Porosité

Les caractéristiques mécaniques sont intimement liées à la microstructure. De nombreuses études ont mis en évidence le lien entre les paramètres mécaniques (résistance, rigidité) et la porosité du matériau. La porosité volumique, la forme et les dimensions des pores sont des indicateurs pertinents des performances mécaniques des bétons. Ils caractérisent la compacité du matériau et donc les capacités mécaniques qui en découlent. La porosité des bétons est caractérisée en trois familles de pores :

Macropores: (rayon de l'ordre du millimètre) principalement due à l'air occlus pendant le malaxage

Pores capillaires: (rayon de l'ordre du micromètre), cette taille de pore correspond aux vides dans la structure cristalline. Elle est fonction du dosage en eau.

Pores relatifs aux hydrates: (rayon de l'ordre du nanomètre); il s'agit de la caractéristique intrinsèque des hydrates formés. [16]

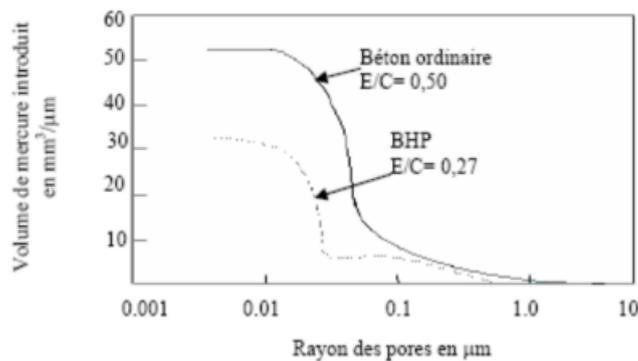


Fig 1.2 Porosité des bétons ordinaires et des BHP [18]

Tant que les granulats et particulièrement les plus gros, sont suffisamment résistants, au fur et à mesure que la porosité de la pâte de ciment décroît, la résistance du béton augmente. Ainsi, la sélection et la composition des ingrédients d'un BHP sont beaucoup plus critiques que dans le cas des bétons usuels.[18]

Perméabilité

La perméabilité est caractérisée par la valeur de débit de transport des fluides et des gaz (eau, chlorure, sulfates, oxygène...) à travers des pores capillaires et des fissures du béton. A cause de leur très grande compacité, les BHP ne sont que très peu perméables. On peut s'en rendre compte lorsqu'on brise des échantillons de béton conservés pendant un an dans l'eau, on constate que le cœur de l'éprouvette est absolument sec.

Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieur du béton tout en le rendant encore plus imperméable.[18]

1.5.2.2 Caractéristiques mécaniques

Résistance à la compression

C'est une caractéristique souvent utilisée pour classer les BHP. C'est ainsi que les spécialistes distinguent

Tableau 1.1 classement des béton selon leur résistance à la compression [15]

Classe	Résistance à la compression à 28 jours (en MPa)
Béton ordinaire	16 à 40
Béton à hautes performances	45 à 60
Béton à très hautes performances	65 à 100
Béton à ultra hautes performances	> 150 (EIFFAGE avec le BSI peut atteindre 195 MPa) et BOUYGUES 250 Mpa

Les gains de résistance se manifestent dès le jeune Age, un béton à 60 MPa à 7 jours. Le BHP se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats et des fois plus.[19]

Résistance en traction

La résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton ordinaire.[19]

Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodessiccation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10⁻⁶) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x10⁻⁶).

Le retrait d'autodessiccation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible.[20]

Fluage

Le fluage est accéléré et se manifeste dès les jeunes âges du béton et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible.

Il est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.

Dans les structures précontraintes, l'utilisation de BHP permet de réduire les pertes de précontrainte associées aux déformations différées du béton. Ce faible fluage permet d'augmenter l'efficacité de la précontrainte et de faciliter le contrôle géométrique des ouvrages.

1.5.3 Avantages des BHP

- Amélioration de la durabilité aux environnements agressifs (grande résistance à la pénétration d'agents agressifs et aux cycles gel/dégel, diminution de la réaction alcali-silice).
- Rapidité de la rotation des coffrages (résistance élevée au jeune âge).
- Diminution des délais de mise en charge des structures (précontrainte accélérée).
- Diminution des sections et des densités de ferrailage et augmentation des portées (Résistance finale élevée).
- Mise en oeuvre facilitée grâce à la fluidité (zones fortement ferrillées, pompage sur grande distance, Amélioration des parements).

- Élévation du module d'élasticité avec diminution du fluage.
- Diminution du retrait pour une limitation des fissures.
- Élévation de la résistance à l'abrasion.
- Renforcement de l'adhérence acier/béton.
- Haute résistance en compression, permettant de réduire les sections des éléments de béton.[21]
- Une quantité de ciment élevée supérieure à 350 kg/m³.
- Un E/C plus faible par l'utilisation de super plastifiants hauts réducteurs d'eau
- Optimisation de l'empilement granulaire (moindre porosité).

1.5.3.1 Avantages pour l'environnement d'utiliser un BHP

Chaque fois que l'on utilise un BHP à la place d'un béton usuel, il est facile de démontrer que l'on utilise de façon beaucoup plus efficace le pouvoir liant du ciment portland. Le rapport eau/liant élevé des bétons usuels conduit à fabriquer un matériau poreux ayant une microstructure et une durabilité particulièrement faible.

Puisque la production du ciment portland consomme beaucoup d'énergie et dégage pratiquement autant de CO₂ que de ciment produit, fabriquer et utiliser un béton de rapport E/C élevé est un geste de gaspillage d'une matière première à très haut contenu énergétique.

Pour s'en convaincre, il suffit de comparer le coût de tous les matériaux nécessaires pour supporter une certaine charge dans un élément structural en béton usuel ou en BHP.

En construisant avec un BHP, on utilise finalement beaucoup moins de ciment et moins de granulats pour reprendre les mêmes efforts structuraux. [22]

1.5.4 Domaines d'application des BHP

Les BHP sont utilisés dans les constructions de toutes tailles quand on cherche à obtenir des résistances mécaniques très élevées, des structures compactes ou des diminutions de section.

Ils permettent aussi de répondre à des exigences d'intégration dans l'environnement, de prendre en compte des contraintes extrêmes sur un plan climatique ou d'apporter une protection à des agressions chimiques.

Les BHP sont utilisés notamment pour la réalisation de :

- Bâtiments de bureau
- Parkings
- Tunnels et travaux souterrains
- Ouvrages d'art et de génie civil, ponts routiers
- Plates-formes d'exploitation et de stockage

- Préfabrication
- Ouvrage en site maritime
- Ouvrages de l'industrie chimique ou du nucléaire, bâtiment agricoles...

Ils permettent la réalisation de parties d'ouvrages fortement sollicitées (voiles, poteaux, poutres, dalles, piles, tabliers...) en béton armé ou en béton précontraint avec la possibilité de réduction des sections dans le respect des règles de calculs. [23]

1.5.5 Exemples d'application du BHP



Fig 1.3 Pacific Tower



Fig 1.4 grande de la défense (paris)



Fig 1.5 Pont de l'île de Ré



Fig 1.6 Poteau des tours Coeur défense

1.6 Conclusion

Ce travail bibliographique a été mené afin de se familiariser avec les bétons (BO,BAP,BHP) et l'objectif étant de les définir, ainsi que citer leurs propriétés, les caractériser, et les principales méthodes de leur formulation.

Bien que les différentes caractéristiques des bétons cités offrent plusieurs avantages par rapport aux bétons usuels, il y a encore place à l'amélioration comme tous les autres matériaux, ont encore des points faibles.

De nombreux progrès dans la compréhension des propriétés des bétons, et plus généralement dans celles du béton, ont suivi les progrès réalisés grâce à une meilleure connaissance de la microstructure des bétons .Il semble que la prochaine étape majeure dans la compréhension des bétons viendra d'une meilleure connaissance du matériau ce qui représente un véritable défi pour les années à venir chose certaine, en tant que matériau de construction.

De nombreuses découvertes et de nombreux développements se produiront surement dans le domaine du béton ;ils seront la conséquence d'un effort de recherche qui tentera de lier la science et la technologie du béton ,parceque en dépit de sa complexité,le béton est un matériau qui comme tous les autres matériaux obéit aux lois de la physique, de la chimie et de la thermodynamique ,mais aussi aux lois du marché.

Références bibliographiques

- [1] Histoire du béton disponible sur : lafarge.fr/histoire-du-beton
- [2] « Béton » disponible sur : fr.wikipedia.org/wiki/Béton
- [3] disponible sur : <http://www.guidibeton.com>
- [4] Hélène HORSIN MOLINARO - Xavier JOURDAIN Édité le 15/10/2018
- [5] Jean-Michel TORRENTI, « BÉTON », Encyclopædia Universalis [en ligne]
- [6] Béton ordinaire : caractéristiques, avantages et inconvénients et prix : disponible sur : <http://www.ideemag.com>
- [7] : Béton autoplaçant ,disponible sur : <http://www.betonix.be>
- [8] Khayat K., «Les bétons auto nivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation »,p 479-483, Eyrolles, 1997.
- [9] Béton autonivelant : avantages et inconvénients : disponible sur <http://www.bétonsurface.ca>
- [10] BRAHIM.N, «Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants».Mémoire de magister, Université de Mohamed Khider –Biskra, 2006
- [11] Holcim, «Le béton autocompactant»,Recommandation étudiée par la société Holcim,Suisse,26 Novembre 2004.
- [12] NEVILLE. A.M, «Propriétés des bétons». Version française traduit par CRIB. Eyrolles,2000.
- [13] Abderrahmane. S, «Etude de la durabilité des systèmes béton armé mortiers de réparation en milieu marin». Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 2013.
- [14] BAALBAKIM, « Influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés des bétons : Importance du mode d'interaction des adjuvants». Thèse de Doctorat.Université de Sherbrooke, Québec. Septembre 1998.
- [15] Béton hautes performances disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Béton_hautes_performances
- [16] GOTUWKA Vincent, «Etude expérimentale du comportement mécanique des Bétons à Très Hautes Performances sous sollicitations multiaxiales simples et complexes».thèse de doctorat université de Lille,19 Janvier 1999.
- [17] Dreux G.« Nouveau guide du béton », E. Eyrolles, Paris, 1998.
- [18] Auperin M., Richard F. et al., « Retrait et fluage des bétons à hautes performances ». Annales. I.T.B.T.P, n° 474, mai 1989.

[19] Lakhal Ridha, «Elaboration des bétons a haute performance a base des sous produit locaux formulation et caractérisation physico-mécanique ».Annaba : Université Badji Mokhtar-Annaba.2011

[20] Brahim Safi, « les bétons a haute performance », Chapitre-iv. 30p.

[21] disponible sur : <http://www.infociments.fr/betons/types/betons-hautes-performances/beton-hautes-performances-bhp>

[22] PIERRE-CLAUDE AITCIN, « Bétons Haute Performance", Édition Eyrolles, janvier 2001,660p.

[23] Les bétons à haute performance, Chapitre-3.14p .Disponible sur :

<http://www.infociment.fr/telecharger/CT-G11.94-107.pdf>.Les Bétons à Hautes Performances-BHP-

Info cime

Chapitre 2

indentation

2.1 Introduction

Dans les années 1880 l'indentation fut son apparition. Elle conduit à l'essor de ces techniques de caractérisation mécanique des surfaces, où de nombreux conférences et numéros spéciaux de revue sont consacrés à ce sujet.[1]

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.[2]

L'indentation instrumentée un outil de base qui est amplement répandu du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de son cout relativement faible.

Cette technique permet donc d'analyser et de caractériser les propriétés mécaniques des surfaces de divers matériaux telles que : la dureté, le module d'élasticité et aussi la résistance à la fissuration.

Particulièrement, la technique d'indentation est utilisée pour estimer la ténacité, K_{Ic} , par différentes méthodes basées sur la mesure de la longueur des fissures en fonction des contraintes appliquées sur le matériau[3].Elle peut être appliquée à l'étude du comportement et des systèmes de fissurations sur les matériaux fragiles et métalliques durant l'indentation.

Pendant les deux dernières décennies, la porté de l'essai d'indentation a été prolongée à la gamme des nanomètres. Ceci a été réalisé principalement grâce au développement des dispositifs capable de tracer continuellement la variation Charge-Pénétration durant les deux cycles (chargement et de déchargement).[4]

2.2 Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques dépendent de la nature du matériau (métal, polymère, verre, verre céramique), de sa composition et de sa structure. La structure microscopique est liée aux conditions d'élaboration et aux traitements mécaniques effectués lors de la fabrication.

Les propriétés mécaniques les plus importantes des matériaux sont : le module d'Young E , la dureté H , la ténacité K_{Ic} , et la résistance à la rupture σ_f . Chacune d'entre elles est déterminée par une technique spécifique.

2.3 Techniques d'indentation

2.3.1 Principe

Le principe d'essai de dureté est le suivant : un pénétrateur supposé indéformable laisse une empreinte dans le matériau à tester sous une charge donnée. Cette empreinte est ensuite mesurée pour calculer la dureté définie comme la charge appliquée divisée par l'aire de l'empreinte.[5]

La dureté est alors définie comme la résistance mécanique qu'oppose le matériau à la pénétration de l'indenteur.

La dureté est définie par la relation suivante :

$$H = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Où

H : La dureté exprimée en MPa ou GPa.

F : La charge exprimée en Newton (N).

A : L'aire de l'empreinte exprimée en mm^2 .

pour mesurer la dureté, il existe deux techniques expérimentales qui déterminent 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 l'essai d'indentation).

2.3.2 Indentation conventionnelle

La surface de l'empreinte est mesurée quand l'indenteur 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 de la forme de l'indenteur) est généralement suffisante pour accéder à la surface.

a) Dureté de Brinell

L'essai de dureté Brinell consiste à appliquer une charge ou force constante, comprise entre 187,5 et 3 000 Kgf, pendant une durée déterminée (entre 10 et 30 secondes), avec une bille en carbure de tungstène de 2,5 ou 10 mm de diamètre généralement. Après le retrait de la charge, le diamètre de l'empreinte laissée est mesuré à intervalle de 90° à l'aide d'un microscope de faible puissance ou d'un dispositif de mesure automatique et le calcul de la moyenne fournit la valeur de dureté. La dureté Brinell ou nombre de Brinell est notée par les deux lettres HB ou BH [6].

La formule utilisée pour calculer la valeur de dureté Brinell (HB) réelle à partir des dimensions de l'empreinte et de la charge d'essai est la suivante :

$$HB = \frac{2F}{g \cdot \pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

Avec :

F : Charge appliquée exprimée en N.

D : Diamètre de la bille en mm.

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

G : Accélération terrestre exprimée en $m \cdot s^{-2}$

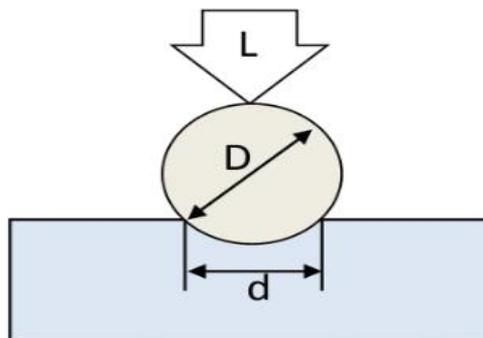


Fig 2.1 Schéma représente le principe de la dureté de Brinell [6]

b) Dureté de Vickers

L'essai de dureté Vickers est une méthode d'essai polyvalente utilisée tant pour la macrodureté que la microdureté. Il est adapté à une large gamme de charges et convient pour une vaste gamme d'applications et de matériaux.

Le test de dureté Vickers est souvent considéré comme plus facile à utiliser que les autres essais de dureté : le processus peut être exécuté sur un appareil d'essai universel de microdureté ; les calculs nécessaires sont indépendants de la taille du pénétrateur ; le même pénétrateur (un diamant pyramidal) peut être utilisé pour tous les matériaux indépendamment de leur dureté. [7]

La dureté Vickers (HV) est calculée en effectuant une mesure optique des longueurs des 2 diagonales de l'empreinte du pénétrateur. Les mesures sont converties en HV au moyen d'une table ou d'une formule. L'expression de la dureté Vickers HV est définie par [7] :

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2} \quad (2.3)$$

Par simplification :
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2.4)$$

Où :

HV : Dureté Vickers.

F : Force appliquée exprimée en N.

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

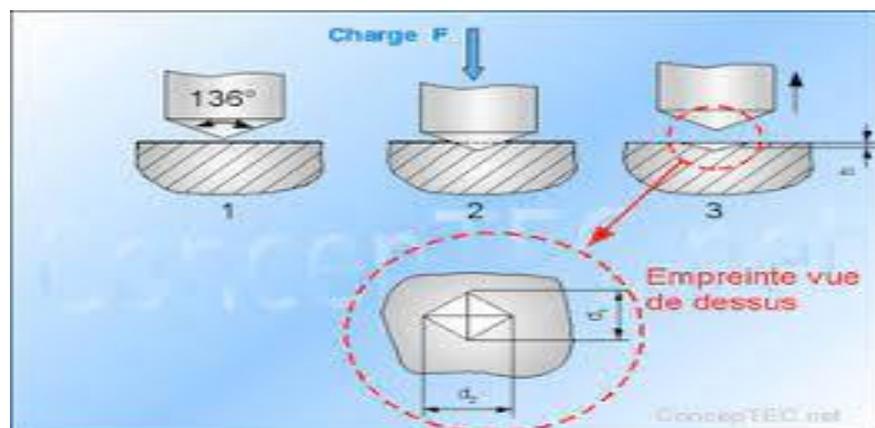


Fig 2.2 Schéma du principe de la dureté de Vickers [8]

c) Dureté de Rockwell

Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge. Il y a plusieurs essais de dureté Rockwell, les principaux sont Rockwell HRC et Rockwell HRB.[9]

01/ Dureté de Rockwell HRC

consiste à mesurer la profondeur de pénétration.

Le pénétrateur est de forme conique diamanté de 120° et arrondi de 0,2mm. La charge à appliquer est de 1370 N [10].

cet essai de dureté Rockwell HRC se réalise comme suit :

- on effectue un pré-charge avec une force F_0 ;
- on applique une force supplémentaire F_1 puis on la relâche ;
- on regarde la différence de la profondeur.

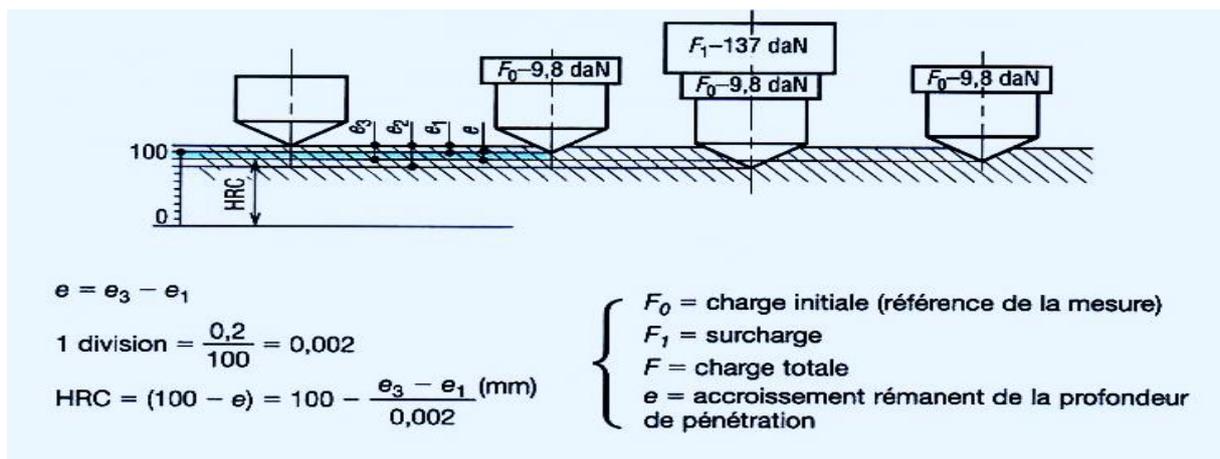


Figure 2.3 : Schéma du principe de la dureté de Rockwell HRC.[10]

02/Dureté de Rockwell HRB

consiste à mesurer une profondeur de pénétration, le pénétrateur étant une bille en acier trempé de 1,5875 mm de diamètre. La charge appliquée est de 883 N. Seulement ici HRB est égale à : $(130 - e)$ mm.

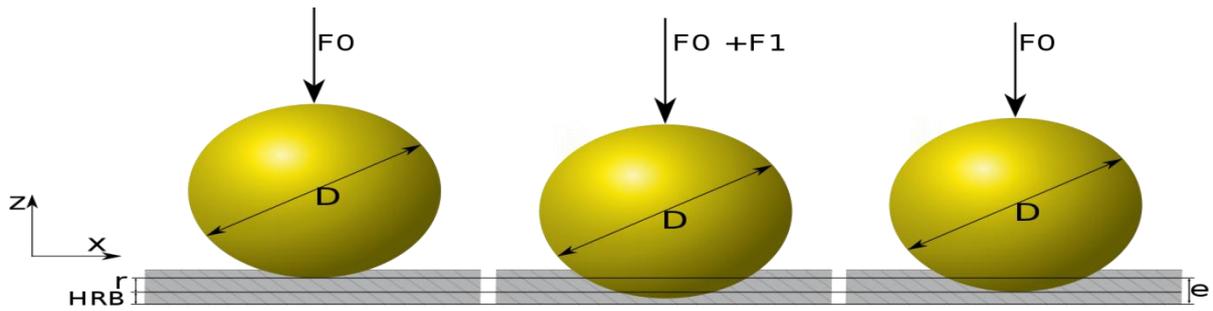


Fig 2.4 Schéma du principe de la dureté de Rockwell HRB.[9]

d) Dureté de Knoop

L'essai de dureté Knoop s'effectue à l'aide d'un pénétrateur en diamant à base losange, dont la grande diagonale est sept fois (plus précisément 7,114 fois) plus longue que la diagonale courte. Cette forme de pénétrateur permet de réduire au maximum le retour élastique. Les essais de dureté Vickers. et Knoop sont réalisés avec la même méthode et le même duromètre. La méthode Knoop mesure toutefois uniquement la longue diagonale, ce qui rend ces essais légèrement plus rapides.[11]

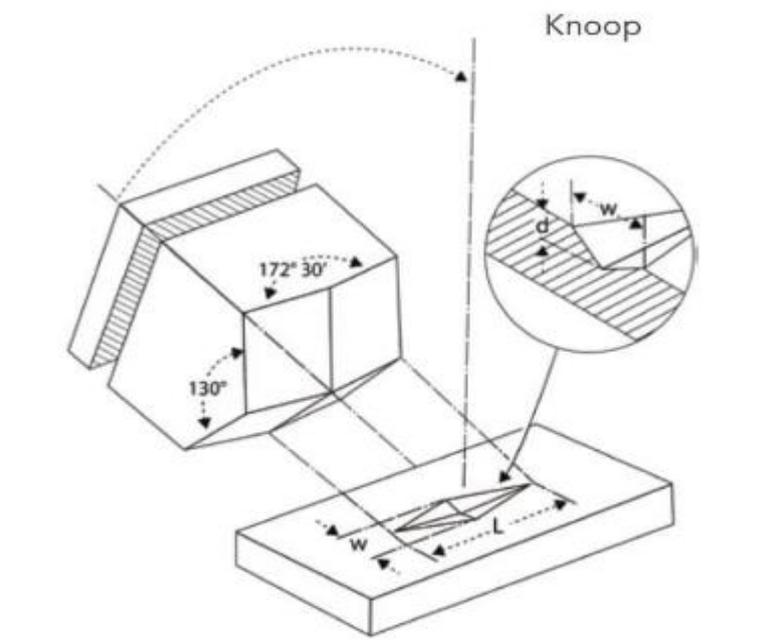


Fig 2.5 Schéma du principe de la dureté de Knoop HK. [11]

La dureté de Knoop (HK) est donnée par la formule suivante :

$$HK = \frac{14,229 F}{L^2} \quad (2.5)$$

Avec :

F : la charge exprimée en kgf.

L² : l'aire de l'empreinte exprimée en mm².

e) Dureté de Berkovich

Le principe est le même que dans l'essai de Vickers. Il consiste à pénétrer dans le matériau testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base triangulaire.

Les angles qui caractérisent la géométrie de l'indenteur Berkovich sont :

- Angle entre la hauteur de la pyramide et une de ses faces, cet angle est égale à 65.27°, soit environ 65.3°.
- Angle entre la hauteur et une arête de la pyramide, cet angle est égale à 76.9°.

La dureté Berkovitch (HBch) est donnée par la relation suivante [12] :

$$HBch = \frac{P}{(4,95 d)^2} \quad (2.6)$$

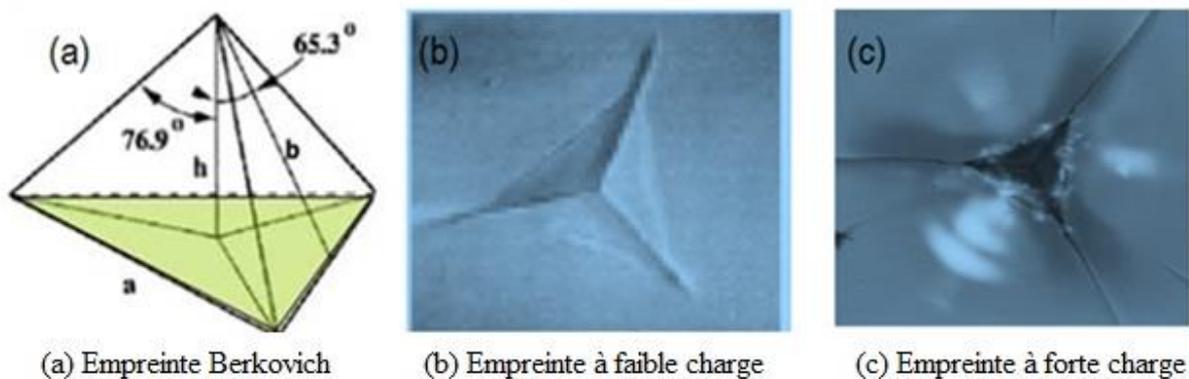


Fig 2.6 Schéma représentatif la dureté Berkovich avec ses angles caractéristiques et des exemples d'empreinte pyramidale sous différentes charges.[12]

Le tableau ci-dessous regroupe les définitions et les nombres de duretés des principaux essais de dureté par pénétration :

Tableau 2.1 : Principe et nombres de dureté des principaux essais de dureté par pénétration.[13]

Type d'indenteur	Vickers	Brinell	Knoop	Berkovitch	Rockwell C
Matériau	Diamant	Tungstène	Diamant	Diamant	Diamant
Géométrie de l'indenteur	Pyramide à base carrée d'angle entre faces de 136°	Bille de diamètre D	Pyramide à base losange d'angle 172,30 et 130	Pyramide à base triangulaire d'angle entre faces 65,3°	Cône d'angle 120°
Paramètre géométrique mesuré	d : diagonale de l'empreinte	d : diagonale de l'empreinte	L : longueur de la plus grande diagonale de l'empreinte	d : profondeur de l'empreinte	e : déplacement du cône lors de l'indentation
Nombre de dureté	$HV = \frac{1854,5 \cdot P}{d^2}$	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	$HK = \frac{14,228 \cdot P}{L^2}$	$H = \frac{P}{(4,95 \cdot d)^2}$	$HRC = 100 - e$
Unités	P en gf, d en µm H _v en Kgf/mm ²	P en Kgf, d et D en mm, HB en Kgf/mm ²	L en mm, P en Kgf, HK en Kgf/mm ²	P en mN, d en mm, H en GPa.	e = 0,002mm
Echelle de charge	Microdureté macrodureté	Macro dureté	Microdureté macrodureté	Nanodureté	Macro dureté

2.4 Indentation instrumentée

2.4.1 Définition

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.[2]

Elle est employée pour étudier le comportement mécanique de différents matériaux tels que : les verres céramiques et les verres, (céramiques ou métalliques).

2.4.2 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.la courbe d'indentation permet d'obtenir des informations sur les propriétés élastiques et plastiques de matériaux.[1]

2.4.3 Phases durant l'essai d'indentation

- Première phase (le chargement):

Une fois le contact établi, la charge imposée est progressivement augmentée, l'indenteur s'enfonce jusqu'à atteindre un seuil correspondant à un effort maximum ou un déplacement maximum.

- Deuxième phase (Le maintien):

La charge maximale est maintenue pendant la durée voulue.

- Troisième phase (le 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.[15]

2.5 Caractérisation de la ténacité K_{Ic} par indentation

2.5.1 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 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 $\pm 50\%$.[16]

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 formés.

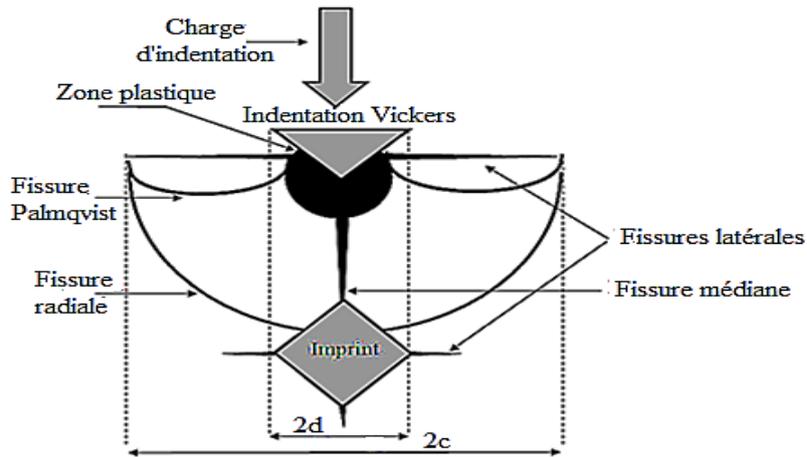


Fig 2.7 Représentation schématique des systèmes de fissures induits par indentation Vickers

Ils existent différents types de fissures générées par une indentation. Pour un pénétrateur pyramidal Vickers, on constate trois types de fissures:

- **Fissure médiane**

Elle s'étend en profondeur pendant le chargement et atteint sa taille d'équilibre mécanique à la charge maximale.

- **Fissure radiale**

Elle s'étend en surface à partir des angles de l'indenteur, une fois que la charge est supprimée. Ce type de fissure se développe sous l'effet des contraintes résiduelles.

- **Fissure latérale**

Elles proviennent également de l'action des contraintes résiduelles [13]. Ces fissures se développent presque parallèles à la surface et sont responsables de l'écaillage de l'échantillon.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a essayer de définir les différentes techniques d'indentation fréquemment utilisé pour la caractérisation des matériaux et les expliquer.

L'indentation est un outil très important pour caractériser et analyser les propriétés mécaniques des différents matériaux, comme Kic la dureté et le module de Young qui sont obtenus par des moyens d'essais instrumentés en nano, macro et micro indentation en utilisant des différents indenteurs connus.

L'objectif de l'étude des méthodes et techniques d'indentation reste toujours comprendre le comportement mécaniques et les propriétés des matériaux et parfois les améliorer pour une meilleur performance.

Références bibliographiques

- [1] E. Barthel, D. Chicot, J.P. Guin, E. LeBourhis, G. Mauvoisin, "L'indentation : un outil de caractérisation multi-échelle des matériaux," Commission thématique Indentation France, SF2M 2014.
- [2] Indentation (matériau), disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Indentation_\(matériau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Indentation_(matériau))
- [3] 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.
- [4] X.D. Li., B. Bhushan., A review of nanoindentation continuous stiffness measurement technique and its applications., J. Mater. Charac., 48: p.11, 2002.
- [5] D. Tabor., The hardness of solids., Review of Physics in Technology., 1 : p.145, 1970.
- [6] "Essai de dureté Brinell" disponible sur :
<http://www.buehler.com> brinell-hardness-testing
- [7] Connaissances en matière d'essai de dureté vickers disponible sur :
<http://www.struers.com/fr-FR/Knowledge/Hardness-testing/Vickers>
- [8] Dureté Vickers – concepTEC.net
- [9] "Dureté Rockwell" disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté_Rockwell
- [10] 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
- [11] "Essai de dureté Knoop" disponible sur :
<https://www.buehler.fr/knoop-hardness-testing>
- [12] 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.
- [13] A.Pertuz,"Indentation Vickers et Knoop des matériaux massifs ou revêtus : dureté ; ténacités et adhérence," Thèse de Doctorat, Université de Lille 1 (France), 2003.
- [14] J.L. Loubet, J.M. Georges, and G. Meille., "Vickers indentation curves of elastoplastic materials. 'Microindentation techniques in Material Science and Engineering,'" ASTM STP889, P.J. Blan and B.R. Lawn, Eds, Amer.Soc.Test and Mater, Philadelphia: p.72, 1986.

[15] B.Cédric, "Indentation et rhéologie de verres inorganique de 20 à 700°C," Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, 2006.

[16] G.A.Gogotsi, "Criteria of fracture (edge chipping and fracture toughness tests)," *Ceram. Int.*, Vol.39, pp.3293-3300, 2012.

Chapitre 3

Partie expérimentale

3.1 Introduction

la première partie consiste à préparer les échantillons et procéder expérimentalement la fabrication de ces matériaux utilisés (BO30,BAP30,BHP50).

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.

la deuxième partie, et en utilisant la technique d'indentation classique par un indenteur Vickers.

3.2 Formulation des bétons

3.2.1 Préparation des échantillons

BO 30 (béton ordinaire avec une résistance $R_m=30$ Mpa)

Pour 1 m³ du béton ordinaire, le dosage est :

Gravier ----- 1157 kg

Sable ----- 631 kg

Ciment ----- 418 kg

Eau ----- 209 L

On a calculé la quantité, Pour 03 éprouvettes 16/32 + 20 % des constituants :

Eau (L)	4.81
Ciment (kg)	9.62
Sable (kg)	14.53
Gravier (kg)	26.64

BAP 30 (béton autoplaçant avec une résistance $R_m=30$ Mpa)

Pour 1 m³ du béton autoplaçant le dosage est :

Gravier ----- 855 kg

Sable grossier : 596 kg ; sable fin : 336 kg

Ciment ----- 430 kg / superplastifiant : 8 kg

Eau ----- 174.12 L / filler : 43 kg

On a calculé la quantité, Pour 03 éprouvettes 16/32 + 20 % des constituants :

Eau (l)	4
Ciment (kg)	9.9
Filler (ou FS) (kg)	1
Sable (kg)	21.46
Gravier (kg)	19.69
SP (kg)	0.18

BHP 50 (béton à hautes performances avec une résistance $R_m=30$ Mpa)

Pour 1 m³ du béton à haute performance le dosage est :

Gravier ----- 855 kg

Sable ----- 724 kg

Ciment ----- 430 kg / superplastifiant : 3.4 kg

Eau ----- 140 L / filler : 34 kg

On a calculé la quantité, Pour 03 éprouvettes 16/32 + 20 % des constituants :

Eau (l)	3.20
Ciment (kg)	9.20
Filler (ou FS) (kg)	0.78
Sable (kg)	16.68
Gravier (kg)	24.19
SP (kg)	0.18



Fig 3.1 Eprouvette cylindrique 16/32

3.3 rodage et polissage

est effectué sur la même machine classique polisseuse de type Struers 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 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 (fig.3.2).



Fig 3.2 Principe de rodage et polissage du matériau par une polisseuse Struer

La figure 3.3 montre 03 types de béton (BO,BAP,BHP) qui est rodé et poli sur une machine de polisseuse à l'aide des papiers abrasifs à différentes tailles de grains.



Figure 3.3 : Les échantillons des BO,BAP,BHP poli par des papiers abrasifs

3.4 Essais mécaniques

3.4.1 Essai de compression

Pour chaque type de béton (BO,BAP,BHP) les essais de compression sont effectués sur la machine de compression de type "BeraTest AG" labo de génie civil au niveau de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahim. Comme indiqué ci-dessous (fig 3.4)



Fig 3.4 essai de compression avec machine "BeraTest AG"

Tableau 3.1 Les résultats des essais de compression sur les éprouvettes 16/32 pour chaque type de béton

Type de béton	Résistance à la compression à 7 jours (Mpa)	
	Béton ordinaire	29.82
Béton autoplaçant	36.22	41.26
Béton à hautes performances	45.14	47.75

3.4.2 Technique d'indentation

Moyens utilisés

L'instrument utilisé est un microduromètre de type Q30 de la marque Qness Autrichienne, alimenté sous une tension de 230 V, avec une fréquence de 50 Hz et une puissance de 200 w, muni une caméra de résolution de 5 MPa reliée à un ordinateur qui permet de visualiser les empreintes sur un écran. Le traitement des résultats s'effectue à l'aide d'un logiciel « QPix T2 », l'agrandissement varie entre 100 à 1000 plus 4X de zoom. L'intervalle de la charge est varié entre 0.25 g – 31.5 kg.



Fig 3.5 Machine d'indentation Qness 30

3.4.3 essai d'indentation

Les essais d'indentation sont effectués à l'aide du microduromètre type Q30 de la marque Qness, Les charges appliquées sont de 30 à 100 N.

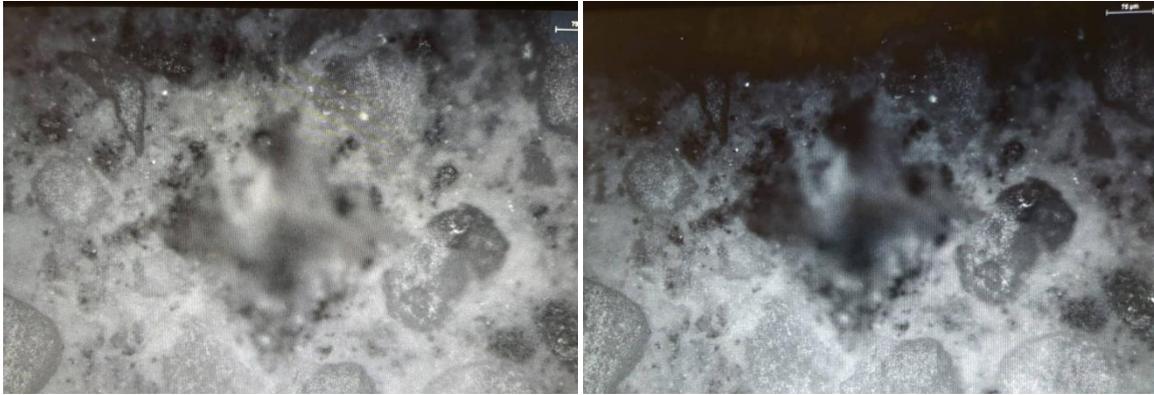


Fig 3.6 empreinte obtenue après essai d'indentation

Le tableau ci-dessous présente les grandeurs moyennes de module d'élasticités E, et les valeurs moyennes de la dureté Vickers HV obtenus par la relation reconnue et équivalente de la dureté Vickers (Tableau 3.2), par contre le curseur permet de mesurer la taille de l'empreinte ($a=d$).

Tableau 3.2 Les grandeurs de E, HV, a, L et C obtenus durant chaque essai d'indentation du béton ordinaire

Matériau utilisé				
charges	Béton ordinaire			
P(N)	C (μm)	E(GPa)	Hv(GPa)	a = d (μm)
30	150.4	38.2	4.5	120.2
50	192.3	44.5	5.2	135.3
100	202.4	47.4	6.6	140.1

Tableau 3.3 Les grandeurs de E, HV, a, L et C obtenus durant chaque essai d'indentation du béton autoplaçant

Matériau utilisé				
charges	Béton Autoplaçant			
P(N)	C (µm)	E(GPa)	Hv(GPa)	a = d (µm)
30	255	39.2	3.7	115.3
50	290.3	44.8	4.2	129.2
100	320.4	52	6.1	145.5

Tableau 3.4 Les grandeurs de E, HV, a, L et C obtenus durant chaque essai d'indentation du béton à hautes performances

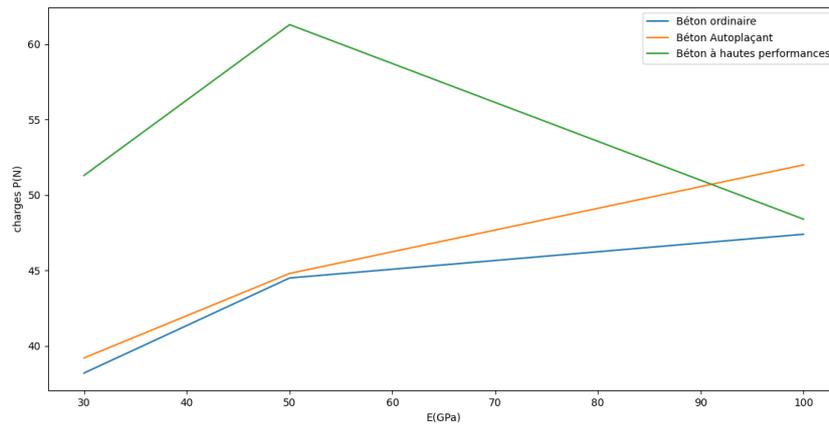
Matériau utilisé				
charges	Béton à hautes performances			
P(N)	C (µm)	E(GPa)	Hv(GPa)	a = d (µm)
30	302.4	51.3	7.1	150.5
50	313.2	61.3	8.5	165
100	331.8	48.4	9.2	172.6

Tableau 3.5: Equations utilisées pour le calcul des paramètres

N°	Equations
1	$K_{ic} = 0,016 \cdot (E/Hv)^{1/2} \cdot P \cdot C^{-3/2}$
2	$Hv = 0,891 \cdot (P / a^2)$
3	$L = C - a \text{ (}\mu\text{m)}$

Tableau 3.6: Valeurs moyennes de la ténacité, du Module d' Young et de la dureté Vickers des des échantillons utilisés

Matériau	E(GPa)	H(GPa)	Anstis (Kic)
BO 30	43.3	5.4	0.5
BAP 30	45.3	4.6	0.4
BHP 50	53.6	8.2	0.1



La figure 3.7 la variation de module du young E en fonction de la charge P pour les bétons (B030,BAP30,BHP50).

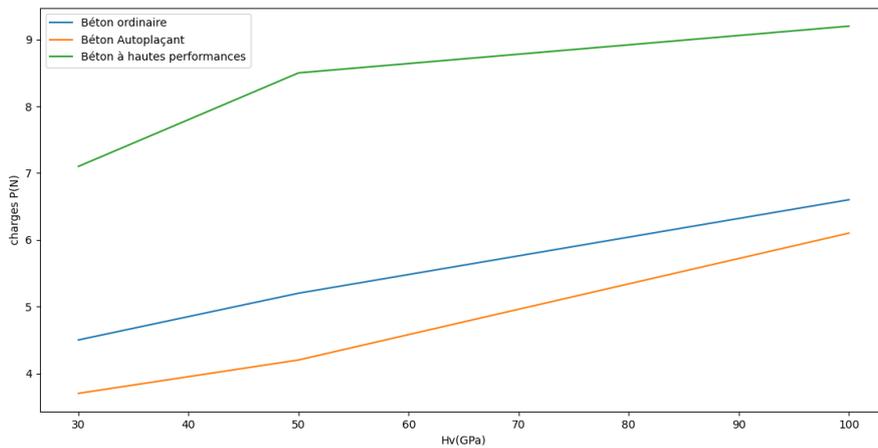


Figure 3.8 la Variation de la dureté Hv en fonction de la charge P sur les bétons (BO30,BAP30,BHP50)

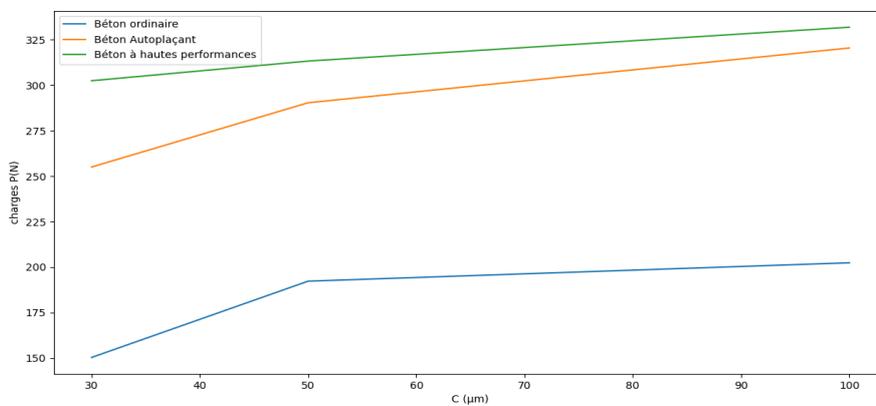


Figure 3.9 la Variation de la la longueur de fissuration C en fonction de la charge P sur les bétons (BO30,BAP30,BHP50)

3.5 Résultats et discussion

Les essais montrent une bonne reproductibilité, malgré que les zones indentées soient différentes. En augmentant la charge de 30 à 100 N le comportement devient plus homogène. la déformation est plus réversible dans le BAP que le BO et BHP.

D'après les essais d'indentation qu'on a fait sur les bétons (BO,BAP,BHP) on observe que :

- La variation de module du young E est proportionnelle à la variation de la charge P pour le béton ordinaire et le béton autoplaçant, pour le béton à hautes performances la valeur de module du young augmente avec le changement de charge jusqu'à atteindre 50 GPA puis redevient décroissante.
- La valeur du paramètre H_v augmente proportionnellement avec la charge P pour les 3 types du béton (BO,BAP,BHP).
- La longueur de fissuration C augmente légèrement quand on varie la charge P pour les 3 bétons utilisés à cause de la dureté de ce matériau.

3.6 conclusion générale

L'étude comparative des différents échantillons du BO,BAP et BHP a été faite pour le calcul des paramètres les plus importants comme la résistance à la compression R_m , la dureté H , module du young E et le facteur d'intensité de contrainte K_{ic} .

L'objectif principal de cette mémoire rentre dans ce contexte il s'inscrit dans le thème général de la recherche et la détermination des caractéristiques mécaniques des différents types du béton étudié et connaître leur comportement sur la base des résultats des expériences.

Nous avons étudié aussi l'effet des charges élevées sur les propriétés mécaniques du béton et D'après les résultats obtenues, les tailles des empreintes et fissures radiales augmentent avec la charge, En appliquant des charges allant de 30 à 100 N. La ténacité K_{ic} a été calculée par la relation d'Anstis parce qu'elle présente des intervalles supérieurs à celle de la relation de Laugier.

Afin d'améliorer les résultats, il serait souhaitable de faire des essais plus systématiques sur les compositions.

Il serait intéressant dans le futur d'étudier l'influence des Conditions de formulation et les facteurs qui influencent sur les paramètres (E,H,K_{ic}). Cela permettra peut être de trancher plus précisément sur les avantages ou les inconvénients des bétons en ce qui concerne les caractéristiques physiques et mécaniques ou le comportement mécanique et Comparer les essais mécaniques standards avec les essais d'indentation (classique et instrumentée).

Résumé

la détermination des propriétés mécaniques des bétons (béton ordinaire, béton autoplaçant, béton à hautes performance) se fait à travers plusieurs étapes, une étude théorique générale sur les types concernés en premier et ensuite préparation des échantillons (une échantillon de chaque type du béton), et après le début des essais mécaniques différentes: essais de compression qui nous permet de déterminer la résistance à la compression des bétons et des essais d'indentation qui nous permet de trouver les autres paramètres tel que la dureté, module de young E et le facteur d'intensité de contrainte kIc.

La détermination de toutes ces caractéristiques permet de comprendre le comportement mécanique du béton et de connaître sa fonction et ses lieux d'utilisation dans le domaine industriel ou architectural.

Mots clés : BO,BAP,BHP ; indentation ; facteur d'intensité de contrainte kIc

Abstract

the determination of the mechanical properties of the concretes (ordinary concrete, self-compacting concrete, high performance concrete) is done through several stages, a general theoretical study on the types concerned first and then preparation of the samples (one sample of each type of concrete) , and after the start of different mechanical tests: compression tests which allow us to determine the compressive strength of concrete and indentation tests which allow us to find other parameters such as hardness, Young's modulus E and the stress intensity factor kIc.

The determination of all these characteristics makes it possible to understand the mechanical behavior of concrete and to know its function and its places of use in the industrial or architectural field.

Keywords: BO, BAP, BHP; indent; stress intensity factor kIc.

ملخص

يتم تحديد الخواص الميكانيكية للخرسانة (خرسانة عادية ، خرسانة مدمجة ذاتيًا ، خرسانة عالية الأداء) عبر عدة مراحل ، دراسة نظرية عامة على الأنواع المعنية أولاً ثم تحضير العينات (عينة واحدة من كل نوع من أنواع الخرسانة)، وبعد ذلك بدء الاختبارات الميكانيكية المختلفة مثل : اختبارات الضغط التي تسمح لنا بتحديد قوة الضغط للخرسانة واختبارات المسافة البادئة التي تسمح لنا بالعثور على معلمات أخرى مثل الصلابة ومعامل يونغ ومعامل شدة الاجهاد. إن تحديد كل هذه الخصائص يجعل من الممكن فهم السلوك الميكانيكي للخرسانة ومعرفة وظيفتها وأماكن استخدامها في المجال الصناعي و المعماري.

الكلمات المفتاحية : خرسانة عادية، خرسانة مدمجة ذاتيًا، خرسانة عالية الأداء، مسافة بادئة، معامل شدة الاجهاد.