

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Aout 1955 - Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

Polycopié de cours

Bétons innovants 1

1^{ère} année Master en Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

Préparé par :

Dr. DJEBIEN Rachid

2023/2024

Avant-propos

Le présent polycopié de cours intitulé « Bétons innovants 01 » est adressé aux étudiants de la 1^{ère} année Master en génie civil, option 'matériaux en génie civil'. Ce cours est enseigné durant le deuxième semestre de leur formation au niveau du département de génie civil de l'université 20 Aout 1955 – Skikda. Ce polycopié de cours est consacré à la présentation des bétons innovants. Pour chacun d'eux, sont présentés spécificités, caractéristiques, principes de formulations, propriétés, et avantages. Cet ouvrage est conçu conformément au programme établi par le ministère pour donner aux étudiants les éléments nécessaires à la compréhension des comportements et des performances des bétons innovants abordés.

Dr. Djebien Rachid

Table des matières

Avant-propos	
Table des matières	
Introduction générale	1
Chapitre 01. Propriétés et performances des matériaux	2
1.1. Introduction	2
1.2. Propriétés du béton à l'état frais	2
1.2.1. Maniabilité et ouvrabilité	2
1.2.2. Air occlus	4
1.2.3. Masse volumique	5
1.2.4. Température	6
1.3. Propriétés du béton à l'état durci	8
1.3.1. Résistance à la compression	8
1.3.2. Résistance à la traction	11
1.3.3. Résistance à la flexion	13
1.3.4. Module d'élasticité	13
1.3.5. Résistance à l'abrasion	14
1.3.6. Résistance au feu	15
1.3.7. Déformations différées	17
1.3.7.1. Retrait	17
1.3.7.2. Fluage	20
1.3.8. Propriétés essentielles de durabilité	23
1.3.8.1. Résistance à la carbonatation	23
1.3.8.2. Résistance aux ions chlorures et aux ions sulfates	24
1.3.8.3. Résistance au gel – dégel	25
1.3.8.4. Phénomène Alkali réaction	26
1.4. Conclusion	27
Chapitre 02. Bétons à hautes performances (BHP)	28
2.1. Introduction	28
2.2. Définition d'un béton à hautes performances	28
2.3. Histoire des BHP	29
2.4. Composition d'un BHP	29
2.4.1. Ciment	30
2.4.2. Granulats	31
2.4.3. Additions minérales	32

2.4.4. Adjuvants	33
2.5. Principes de formulation d'un BHP	33
2.6. Propriétés des BHP	33
2.6.1. Maniabilité	34
2.6.2. Chaleur d'hydratation	34
2.6.3. Résistance à la compression.....	35
2.6.4. Résistance à la traction	35
2.6.5. Module élastique	36
2.6.6. Retrait	10
2.6.7. Fluage	37
2.6.8. Résistance au feu	37
2.6.9. Durabilité	37
2.6.10. Microstructure	38
2.7. Domaines d'application des BHP	38
2.8. Conclusion.....	38
Chapitre 03. Bétons autoplaçants (BAP)	39
3.1. Introduction	39
3.2. Définition d'un béton autoplaçant.....	39
3.3. Composition d'un BAP	39
3.3.1. Particularité de la composition d'un BAP	40
3.3.2. Approches de formulation d'un BAP	41
3.4. Méthodes de formulation des BAP	42
3.5. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	43
3.5.1. La mobilité en milieu non confiné.....	43
3.5.2. La mobilité en milieu confiné	44
3.5.3. La stabilité vis-à-vis la ségrégation	46
3.6. Propriétés essentielles du BAP à l'état durci	47
3.6.1. Résistance à la compression.....	47
3.6.2. Résistance à la traction	47
3.6.3. Module d'élasticité	47
3.6.4. Durabilité	47
3.7. Avantage des BAP	48
3.8. Domaines d'application des BAP	48
3.9. Conclusion.....	48
Chapitre 04. Bétons renforcés de fibres (BRF)	50

4.1. Introduction	50
4.2. Définition d'un béton renforcé de fibres (BRF).....	50
4.3. Historique du béton de fibres	50
4.4. Rôles de fibres dans le béton	52
4.5. Spécificités des fibres	53
4.6. Fibres utilisés dans le béton	53
4.6.1. Fibres métalliques	54
4.6.2. Fibres polypropylènes.....	56
4.6.3. Fibres de verre.....	57
4.7. Orientation préférentielle des fibres	58
4.8. Fabrication et mise en œuvre du béton renforcé de fibres (BRF)	59
4.9. Propriétés des bétons de fibres.....	59
4.10. Domaines d'application des bétons de fibres.....	60
4.11. Conclusion.....	60
Chapitre 05. Bétons à poudres réactives (BPR)	61
5.1. Introduction	61
5.2. Historique sur les bétons à ultra hautes performances (BUHP).....	61
5.3. Définition.....	62
5.4. Composants du béton à poudres réactives	62
5.4.1. Ciment	62
5.4.2. Granulats.....	62
5.4.3. Additions.....	63
5.4.4. Fumée de silice.....	63
5.4.5. Quartz broyé.....	65
5.4.6. Superplastifiant	65
5.4.7. Fibres	65
5.5. Formulation des BPR	65
5.5.1. Principes de formulation.....	65
5.5.2. Effet du rapport Eau/Liant	66
5.6. Propriétés des BPR.....	67
5.6.1. Rhéologie.....	67
5.6.2. Résistance à la compression.....	67
5.6.3. Résistance à la traction	69
5.6.4. Résistance à la flexion	69
5.6.5 Durabilité.....	70

5.6.5.1. Porosité	70
5.6.5.2. Absorption capillaire.....	70
5.6.5.3. Carbonatation et diffusion des ions chlorure.....	70
5.6.5.4. Résistance au gel-dégel.....	71
5.6.6. Résistance à l'abrasion	71
5.6.7. Résistance au feu	72
5.6.8 Retrait	72
5.6.9. Microstructure du BPR.....	73
5.6.9.1. Analyse thermogravimétrique	72
5.6.9.2. Pourcentage d'eau liée	74
5.6.9.3. Taux de pouzzolanicité	74
5.6.9.4. Présence de Xonolite	75
5.6.9.5 Eau extraite	76
5.7. Avantage des BPR	76
5.8. Inconvénients des BPR.....	77
5.9. Domaines d'application des BPR	77
5.10. Conclusion.....	78
Chapitre 06. Les Bétons polymères (BP)	79
6.1 Introduction	79
6.2 Définition.....	79
6. 3. Constituants de béton de polymère	80
6.3.1. Polymères	80
6.3.1.1 Structure et propriétés de polymères	80
6.3.1.2 Applications de polymères	81
6.3.2. Ciment	82
6.3.3. Granulats.....	82
6.3.3. Matériaux de renforts	82
6.4 Classification des bétons polymères	82
6.4.1 Béton imprégné par polymère (BIP)	82
6.4.1.1. Propriétés du béton imprégné par polymère (BIP)	83
6.4.1.2. Domaines d'application des BIP	84
6.4.1.3. Inconvénients d'application des BIP	84
6.4.2 Béton polymère (BP).....	85
6.4.2.1. Propriétés du béton de polymère (BP)	85
6.4.2.2. Domaines d'application des BP.....	86

6.4.2.3. Inconvénients d'application des BP	87
6.4.3 Béton modifié par polymère (BMP)	88
6.4.3.1. Les bétons modifiés par les poudres redispersables	89
6.4.3.2. Les bétons modifiés par les polymères solubles dans l'eau	90
6.4.3.3. Les mortiers modifiés par les résines liquides	92
6.4.3.4. Les mortiers modifiés au latex	93
6.5. Avantages de béton de polymère	94
6.6. Inconvénients de béton de polymère	94
6.7. Domaines d'application de béton de polymère	95
6.7.1. Dans le génie civil et bâtiments	95
6.7.2. Dans l'agriculture et l'horticulture	95
6.7.3. Dans les revêtements des chaussés et planchers	95
6.7.4. Dans les travaux de drainage et hydrauliques	96
6.7.5. Dans l'industrie	96
6.7.6. Dans l'isolation phonique	97
6.7.7. Dans le site d'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs	97
6.7.8. En géothermie	98
6.8. Conclusion	98
Références	100

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de construction. Avec l'apparition des différents produits rentrants dans leur formulation comme les adjuvants et les ajouts, le béton moderne a connu une véritable évolution ; un matériau ordinaire destiné à la réalisation des constructions habituelle vers un matériau innovant de pointe destiné à des applications complexes et importantes. Les bétons innovants sont de plus en plus envisagés notamment lorsque leur utilisation conduite à une diminution significative des coûts initiaux et d'entretien. Il a été démontré que tels bétons sont beaucoup plus avantageux, non seulement du point de vue socio-économique mais aussi environnemental.

Le présent polycopié de cours présente la définition, le principe de formulation, les propriétés essentielles, et les applications des différents types des bétons innovants abordés. Ce polycopié de cours s'articule autour de six chapitres :

Chapitre 1 : Propriétés et performances des matériaux : ce chapitre constitue la première partie de ce cours. Il permettra aux étudiants de connaître les différentes propriétés du matériau 'béton' développées aux états frais et durci de celui-ci.

Chapitre 2 : Béton à hautes performances.

Chapitre 3 : Béton autoplaçant

Chapitre 4 : Béton de fibres.

Chapitre 5 : Béton à poudre réactive.

Chapitre 6 : Béton à base de polymères.

Chapitre 01 : Propriétés et performances des matériaux

1.1. Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Il est présent dans tous les secteurs de la construction, ses qualités et ses performances répondent aux différents besoins en matière de bâtiments et de génie civil en respectant les exigences de sécurité, d'esthétique et de durabilité. Le béton est un matériau minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau et des granulats. Il a un comportement évolutif : il est d'abord fluide à l'état frais, ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis progressivement il devient dur et très résistant. C'est un matériau qui paraît rustique et simple mais qui est en réalité très complexe et possède de multiples propriétés. Il est associé à d'autres matériaux, de l'acier sous forme d'armatures passives ou de précontraintes ou des fibres.

1.2. Propriétés du béton à l'état frais :

Le béton est dit frais lorsqu'il n'a pas entamé son processus de prise et de durcissement. Le béton frais a la capacité de se déformer et de s'écouler ; ce qui permet de le transporter ou de le pomper et de remplir les moules ou les coffrages. A cet état, le béton présente une aptitude au moulage qui lui permet de prendre toutes les formes possibles.

1.2.1. Maniabilité et ouvrabilité :

Le béton frais possède une propriété essentielle et bien particulière : son ouvrabilité. Cette caractéristique constitue un atout majeur du matériau en termes de mise en œuvre. L'ouvrabilité est, en effet, la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise, avant que le matériau ne durcisse, la fluidité du béton. Cette propriété est indispensable pour garantir un parfait remplissage des moules et des coffrages dont les formes sont parfois complexes et un bon enrobage des armatures. Les caractéristiques de l'ouvrage et les moyens de mise en œuvre du béton déterminent une composition dont la maniabilité est mesurée généralement par l'essai au cône d'Abrams 'Slump test' pour les bétons ordinaires. En mesurant la hauteur d'affaissement après le démoulage du cône, on obtient la consistance qui est une grandeur qui donne une indication sur l'ouvrabilité du béton. Plus la hauteur d'affaissement est importante, plus le béton est fluide.



Figure 1.1. Affaissement au cône d'Abrams

Selon la valeur d'affaissement obtenue, le béton est classé en fonction de sa consistance en cinq classes (figure 1.2).

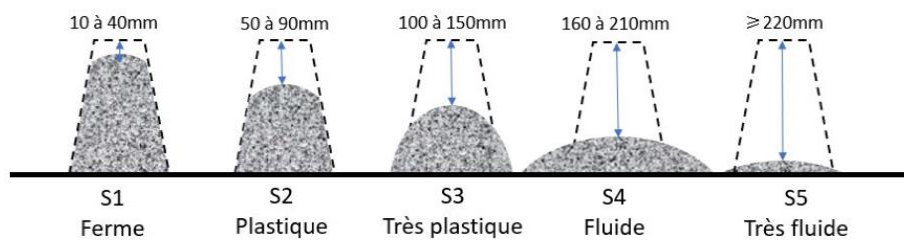


Figure 1.2. Différentes classes de consistance du béton.

Chaque classe de consistance est visée selon le domaine d'utilisation du béton :

- Le béton S1 est utilisé dans le domaine de la voirie (béton de chaussée, béton extrudé pour réaliser les séparateurs de voies, ...). Sa mise en œuvre nécessite des machines spécifiques et un compactage puissant du béton. Il est aussi utilisé dans le cas des bétons fermes pris sous-centrale.
- Le béton S2 est utilisé pour réaliser les ouvrages en pente (ex : descente de garage).
- Le béton S3 est le plus fréquemment utilisé pour tous les ouvrages courants (dalle, voiles, poteaux, poutres, fondations, ...). Très plastique et maniable, c'est la fluidité classique employée pour les bétons traditionnels.
- Le béton S4 (béton fluide) s'utilise dans les structures verticales ou horizontales (ne pas utiliser en cas de pente supérieure à 2%). Il facilite la mise en place, permet un bon remplissage des coffrages dans les structures très ferrillées ou les formes complexes, facilite le pompage, améliore la qualité des parements et simplifie les opérations de vibration. La maniabilité est augmentée sans rajout d'eau. La fluidification se fait en centrale par ajout d'adjuvant fluidifiant.
- Le béton S5 est très fluide. Cette catégorie regroupe notamment les bétons autoplacants. Ces bétons sont mis en œuvre sans vibration, car ils se compactent sous

leur propre poids. Ils sont utilisés pour des applications horizontales et verticales (voiles, poutres, poteaux, fondations superficielles, fondations profondes, dalles, dallages, remplissage de blocs à bancher...). La mise en œuvre est encore plus facilitée, et ils permettent le remplissage de formes complexes et / ou fortement ferrillées. Leur niveau de fluidité très élevé est rendu possible grâce à l'emploi d'adjuvant spécifique (superplastifiant) ainsi qu'à l'ajout d'addition (ex : filler calcaire) en plus du ciment.

De nombreux paramètres influent sur la maniabilité :

- nature et dosage en ciment et en fines,
- propreté, forme et granulométrie du squelette granulaire,
- dosage en eau,
- emploi des adjuvants (réducteurs d'eau, modificateurs de prise).

Une attention particulière doit être accordée au dosage en eau, le dosage en eau ne doit pas être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'augmenter l'ouvrabilité.

Un excès d'eau est préjudiciable au béton car il engendre :

- le ressuage : création d'un film d'eau en surface du béton, qui engendre de la fissuration après évaporation;
- une diminution des résistances mécaniques ;
- une porosité élevée et donc une mauvaise durabilité du béton ;
- un risque de ségrégation des constituants du béton (séparation entre la pâte et les gravillons, ces derniers descendent dans le fond du coffrage) ;
- un retrait augmenté et donc un risque fort de fissuration ;
- des parements de mauvaise qualité (bullage, veines de sable, nids de graviers, surface poudreuse).

Pour éviter ces phénomènes, La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

1.2.2. Masse volumique:

La masse volumique du béton est une grandeur physique qui consiste à mesurer le poids du béton par unité de volume. La masse volumique d'un corps (ρ) est calculée en divisant la masse de ce corps (m) par son volume (V)

$$\rho = m/V$$

La masse volumique s'exprime dans le système international en kilogramme par mètre cube (kg/m^3), cependant on peut aussi l'exprimer en tonne par mètre cube (t/m^3).

La masse volumique béton est directement liée à la masse volumique des matériaux qui le compose et leur dosage : quantité de ciment, sable, gravillon, eau, et autres ajouts (adjuvants, colorants, fibres, ...).

Selon la valeur de la masse volumique, on distingue trois types de bétons :

- béton traditionnel (ordinaire) : la masse volumique est comprise entre 2200 et 2400 kg/m^3 . Elle varie en fonction de la masse volumique des constituants (principalement les granulats – sable gravier), leurs dosages, mais également de la quantité d'air qu'il renferme (air occlus lors de la fabrication, du transport par camion toupie et à la mise en œuvre).
- béton léger : la masse volumique est comprise entre 200 et 1800 kg/m^3 . La densité du béton léger varie selon le type de granulats légers utilisés (granulats légers type argile ou schiste expansé, polystyrène expansé, ...).
- béton lourd : la masse volumique est comprise entre 3000 et 5000 kg/m^3 (densité du béton lourd) selon le type de granulats lourds utilisés (barytine, magnétite, hématite, déchets ferreux de type riblons ou grenaille, ...).

1.2.3. Air occlus:

L'air est inévitablement présent dans le béton. Au cours de la fabrication (malaxage), le transport, la mise en œuvre du béton (chute du béton), une quantité d'air occlus se retrouve piégée dans le béton frais et donc dans le béton durci sous forme de bulles d'air et de cavités. La mesure du pourcentage d'air occlus s'effectue à l'aide d'un appareil 'l'aéromètre'.



Figure 1.3. Aéromètre à béton.

La mesure de cette quantité d'air occlus donne une première indication sur la compacité du béton. La teneur en air du béton est fonction du diamètre maximum des granulats (D_{\max}). Pour un béton compact de bonne composition granulométrique, la teneur en air doit être inférieure ou égale aux valeurs montrées dans le tableau 1.1 :

Tableau 1.1. Valeurs optimales de l'air occlus.

D_{\max} (mm)	10	12.5	20	25	40
Teneur en air en %	3	2.5	2	1.5	1

1.2.4. Température :

L'hydratation du ciment est toujours accompagnée du dégagement d'une certaine quantité de chaleur. Cependant, l'amplitude de ce dégagement de chaleur et, surtout, l'élévation de température qui en résulte dépendent de plusieurs facteurs : la quantité de ciment qui s'hydrate, le type de ciment, les propriétés thermiques des granulats, les conditions thermodynamiques au cours de la maturation, la forme et la dimension de l'élément en béton. Habituellement, on constate une période pendant laquelle l'augmentation de la température du béton est négligeable. Après ce palier, la température du béton augmente de façon plus ou moins rapide et intense. Finalement, l'hydratation se poursuit par une période prolongée durant laquelle la température du béton diminue progressivement pour revenir à la température ambiante (figure 1.4).

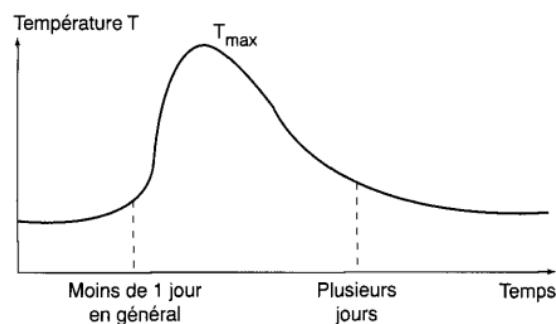


Figure 1.4. Variation de la température du béton en fonction l'âge du béton.

La formation de cristaux durant la réaction d'hydratation s'accélère avec l'augmentation de la température. Cette réaction accélérée signifie que les cristaux n'ont pas assez de temps pour se renforcer, ce qui affecte plus tard la résistance du béton lui-même. Dans ces cas, la résistance au jeune âge est élevée, mais après 28 jours (durée de maturation du béton), le béton présente une résistance moins élevée que celle du même béton qui aurait été conservé à une température plus basse (Figure 1.5).

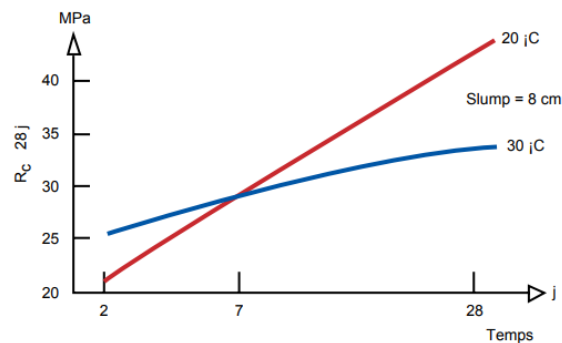


Figure 1.5. Effet de la température du béton sur la résistance à la compression du béton.

Il est important de tenir compte de ce phénomène et il faut se souvenir que les réactions d'hydratation sont plus ou moins exothermiques selon les types de ciment et que cet effet se cumule avec celui de la température extérieure. L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et la prise du béton devient plus rapide (Figure 1.6).

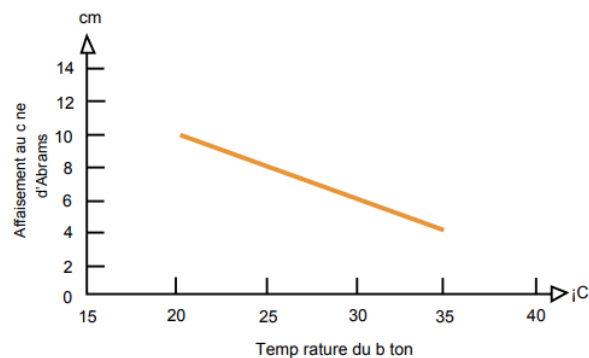


Figure 1.6. Effet de la température du béton sur la consistance du béton.

L'augmentation de la température du béton conduit aussi à des valeurs de retrait plastique et thermique élevées qui peuvent engendrer la fissuration. La mesure de la température interne du béton permet aussi de détecter si le béton est susceptible de subir un échauffement, pouvant entraîner des réactions sulfatiques internes (RSI) correspond à la réaction entre les ions sulfates de la solution interstitielle du béton et des aluminates du ciment. Elle peut conduire à la formation d'étringites, provoquant des gonflements puis des fissurations à la

surface du béton. Ce phénomène touche en particulier deux types de béton, ceux traités thermiquement et ceux coulés dans des endroits où la chaleur dégagée ne peut être évacuée complètement, c'est-à-dire les éléments de grande épaisseur.



Figure 1.7. Thermomètre à béton.

La température du béton frais lors du coulage doit être d'au moins 7°C (exceptionnellement 3°C) et d'au plus 25°C (exceptionnellement 30°C).

1.3. Propriétés du béton à l'état durci :

Le durcissement du béton est un phénomène de "cristallisation". Des cristaux se forment et s'enchevêtrent les uns avec les autres. Le béton qui est parfaitement fluide avant la prise du ciment devient ainsi progressivement dur. Le mélange eau et ciment ainsi "cristallisé" enserre les granulats et produit un matériau compact qui possède des propriétés particulières. Le durcissement se poursuit de manière continue pendant plusieurs mois. Le béton a besoin d'une quantité d'eau égale à 25 % du poids de ciment pour l'hydratation de celui-ci. Mais pour qu'il puisse être mis en place et rester suffisamment maniable à utiliser, une quantité double d'eau est en général nécessaire. La pâte (mélange du ciment et de l'eau) joue le rôle de lubrifiant puis de colle.

1.3.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante recherchée pour le béton durci. C'est sur elle que se basent le calcul et le dimensionnement d'une structure en béton. Elle dépend notamment de la quantité de ciment, du type de ciment, de la quantité d'eau, et de l'utilisation des adjuvants. Conventionnellement, on classe le béton en fonction de sa résistance mécanique en compression mesurée à 28 jours. Elle est exprimée en mégapascals (MPa). Les bétons usuels présentent des résistances comprises entre 25 et 40 MPa. Au-delà de 50 MPa, on parle de bétons à hautes performances. La progression de la réaction d'hydratation de ciment qui permet au béton de ciment de faire prise est assez lente : au bout de 7 jours, la résistance mécanique atteint à peine 75 % de la résistance finale. La valeur prise

comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours, équivalent à 80 % de la résistance finale.

La classe de résistance des bétons utilisés dans la construction est déterminée lors du calcul de dimensionnement de l'ouvrage en fonction des sollicitations appliquées et l'agressivité du milieu dans lequel l'ouvrage est implanté pour pouvoir satisfaire les critères en matière de durabilité.

Différents paramètres influent sur la résistance à la compression du béton qui sont :

- **Dosage en eau :** La quantité d'eau de gâchage joue un rôle important dans la résistance d'un béton, un léger excès, ou une légère insuffisance fait rapidement diminuer les qualités d'un béton. En effet, un excès d'eau augmente la porosité dans le béton qui se traduit par une baisse de résistance mécanique. D'autre part, un manque d'eau donne un béton ferme difficile à compacter. Il convient donc de déterminer minutieusement la quantité d'eau à utiliser dans la composition d'un béton. L'utilisation d'un adjuvant réducteur d'eau est recommandée pour la fabrication d'un béton de bonne qualité.
- **Type et dosage en ciment :** La composition du ciment influe de manière significative sur la résistance du béton. La résistance du béton au jeune âge est attribuable à la teneur plus élevée en silicate tricalcique (C_3S) que la teneur en silicate dicalcique (C_2S). La résistance caractéristique à la compression du ciment influe aussi sur le développement de la résistance du béton. Le béton fabriqué avec un type de ciment présentera une résistance plus ou moins importante en fonction de la classe vraie de ce ciment. De même, un ciment finement broyé donnera une résistance initiale plus élevée qu'un ciment plus grossier, même s'ils ont une composition chimique similaire. Concernant le dosage en ciment, plus le dosage en ciment est élevé, plus la résistance du béton sera importante. La figure 1.8 montre l'effet de l'augmentation de dosage en ciment sur la résistance à la compression du béton.

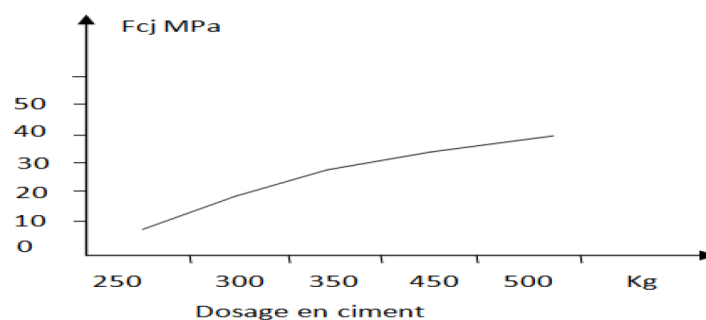


Figure 1.8. Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression.

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment (C) et elle décroît avec l'augmentation du dosage en eau (E), c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte un rapport E/C comme facteur global intervenant dans la résistance et la durabilité du béton. En effet, le rapport E/C est un paramètre déterminant vis-à-vis de la porosité, de la résistance et donc de la durabilité du béton. Plus le rapport E/C est faible plus les propriétés du béton sont améliorées. En règle générale le rapport E/C est compris entre 0,4 et 0,6.

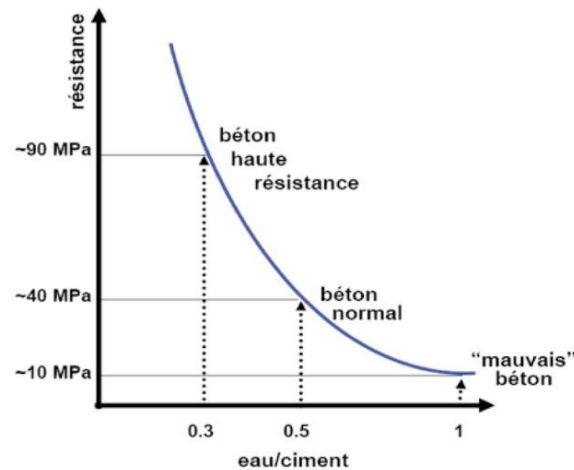


Figure 1.9. Variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C.

- Qualité de granulat :** Les granulats participent à la résistance caractéristique et à la durabilité du béton. Ils interviennent essentiellement par leur granulométrie, forme, propreté, porosité et dureté. Un bon empilement granulaire contient autant que possible de gros grains avec un volume de vides minimal. Ce qui permet d'avoir une bonne compacité et par conséquent une meilleure résistance. L'excès d'éléments fins demande un surplus d'eau de mouillage, ce qui peut influencer négativement sur la résistance. En plus, La forme des grains est également un facteur important que la granulométrie. La résistance du béton dépend strictement de la forme des grains. Généralement, les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés, l'adhérence à la pâte pure est meilleure du fait de la surface rugueuse présentée par ces granulats. Les granulats doivent aussi être propres, et ne pas contenir d'argile. En effet si les grains de granulats sont enrobés d'une couche d'argileuse, d'une part, la mise en œuvre du béton est rendue beaucoup plus difficile, et d'autre part l'adhérence des grains à la pâte de ciment est très altérée et par conséquent le béton présente une mauvaise résistance en particulier à la traction. La teneur en matières organiques doit être aussi faible que possible, certaines matières organiques peuvent perturber et même stopper la prise et le durcissement du ciment. Pour la

confection d'un béton de bonne qualité, il est préférable d'utiliser des granulats qui se caractérisent par une dureté élevée.

La résistance à la compression du béton se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Elle varie suivant la taille des éprouvettes testées. Plus celles-ci sont petites, plus les résistances sont élevées. La résistance sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm.

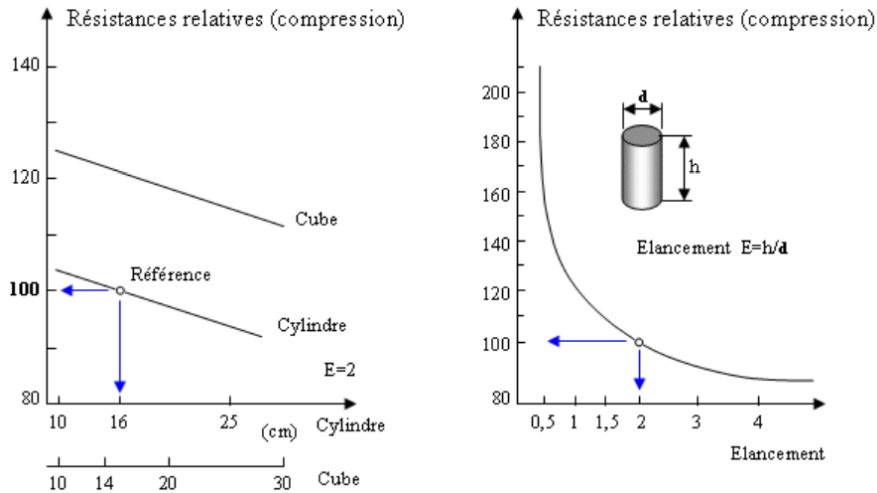


Figure 1.10. Variation de la résistance à la compression en fonction des dimensions des éprouvettes.

1.3.2. Résistance à la traction :

S'il résiste très bien à la compression, le béton est un matériau dont la résistance à la traction est faible. La résistance du béton ordinaire à la traction varie entre environ 7 et 10% de la résistance à la compression. Cela est expliquée par le fait qu'en traction, le béton se rompt par la propagation rapide d'une simple fissure alors qu'il faut qu'un certain nombre de fissures de traction qui se réunissent et se propagent profondément dans la zone de compression pour induire la rupture par compression. Cependant, la résistance en traction est considérée comme un critère de qualité, particulièrement pour les bétons d'autoroute, les dalles flottantes, et d'une manière générale lorsqu'il s'agit d'efforts de cisaillement et de résistance à la fissuration. La connaissance de cette dernière permet d'estimer la charge qui entraînera la fissuration. L'absence de fissuration est extrêmement importante pour assurer la durabilité d'une structure en béton et, dans de nombreux cas, pour éviter la corrosion des armatures. Des problèmes de fissuration apparaissent à la suite d'un effort de traction dû à des charges appliquées, mais aussi causé par le retrait gêné et par les gradients thermiques. Il est aussi intéressant de

connaître la résistance à la traction du béton dans les structures de masse, telles que les barrages, les chaussées d'autoroute ou les pistes d'aéroport, car souvent soumises à des retraits et à des effets de températures élevés.

La mesure de la résistance de à traction se fait généralement par deux méthodes :

- **Essai de traction directe :** cet essai est le plus représentatif du comportement mécanique en traction mais il est très délicat à réaliser. Il consiste à appliquer directement un effort de traction pure sur les extrémités de l'éprouvette à l'aide de mors ou de colle. Ce procédé fait apparaître des contraintes parasites telles que celles induites par les mâchoires ou par des ancrages noyés et ainsi des résultats très dispersés sont généralement obtenus. Plusieurs types d'essais de traction indirecte sont utilisés pour calculer la résistance à la traction du béton, comme l'essai de fendage ou l'essai de flexion trois points. L'essai de traction directe sur le béton à l'échelle de l'interface pâte de ciment - granulat est cependant moins étudié.
- **Essai de traction par fendage :** L'essai par fendage du béton est réalisé de la même manière que l'essai de compression, mais l'éprouvette béton sera placée horizontalement afin de la fendre de manière longitudinale. L'essai de fendage permet de mesurer indirectement la traction du béton. Des lamelles en contre-plaqué sont placées entre l'éprouvette et les plateaux de la presse à éprouvettes de béton pour éviter que la contrainte de compression soit trop élevée et obtenir une résistance à la traction plus proche de la réalité. la résistance en traction σ_{rupt} en MPa, est égale à :

$$\sigma_{rupt} = 2 \frac{F}{\pi d L}$$

Avec F la charge maximale en N, d le diamètre de l'éprouvette en mm et L la hauteur de l'éprouvette en mm.

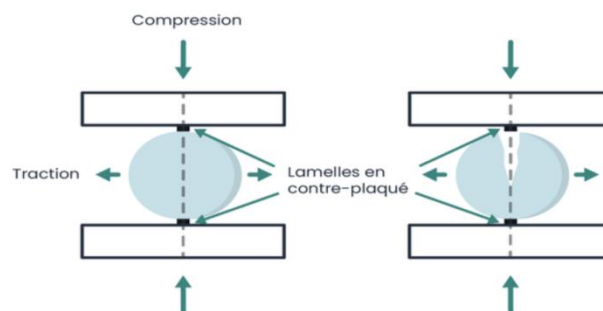


Figure 1.11. Principe de l'essai de traction par fendage.

1.3.3. Résistance à la flexion :

La flexion constitue une sollicitation, susceptible de s'exercer sur le béton, au sein d'un ouvrage. La flexion représente environ 10 à 20% de la résistance à la compression, en fonction du type, de la taille et du volume des agrégats grossiers utilisés. La détermination de la résistance à la flexion se fait généralement par un essai de flexion qui s'effectue en général sur des éprouvettes prismatiques d'élançement 4, reposant sur deux appuis :

- soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre). Cet essai est dit de flexion à 3 points. La résistance à la flexion est donnée par la formule :

$$\sigma_{flex} = \frac{3}{2} \frac{F l}{d_1 d_2^2}$$

- soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges). Cet essai est dit de flexion à 4 points. La résistance à la flexion est donnée par la formule :

$$\sigma_{flex} = \frac{F l}{d_1 d_2^2}$$

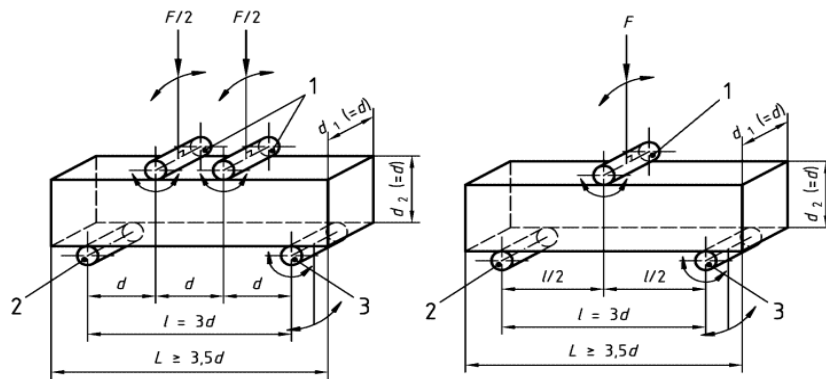


Figure 1.12. Principe de l'essai de flexion.

1.3.4. Module d'élasticité :

Comme tous les autres matériaux, le béton se déforme, on dit qu'il a un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durée, c'est-à-dire que ses déformations sont proportionnelles aux charges appliquées. Au-delà d'une certaine valeur de charge, le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente. Le module d'élasticité ou le module de Young est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et

la déformation d'un matériau élastique isotrope. Le module de Young est utilisé en résistance des matériaux pour le dimensionnement des structures. La mesure du module de Young permet également de quantifier l'avancement de l'état de déformations de matériaux sous une sollicitation donnée.

Pour le béton, on distingue deux modules d'élasticité ; le module de Young instantané E_{ij} et différé E_{vj} . Ces deux modules sont calculés par les formules :

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{1/3}$$

$$E_{vj} = 3700 (f_{cj})^{1/3}$$

Avec f_{cj} est la résistance à la compression du béton au jour j .

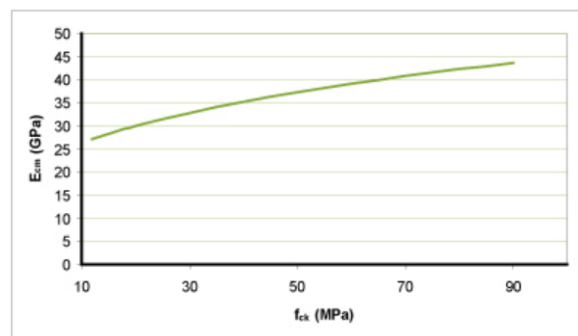


Figure 1.13. Relation entre la résistance à la compression et le module d'élasticité instantané.

Généralement, le module d'élasticité instantané E_i d'un béton est compris entre 30 et 35 GPa.

La déformation longitudinale est toujours accompagnée d'une déformation transversale, le coefficient de poisson ν par définition est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale. Le coefficient de poisson est pris égal à 0.2 dans le calcul des éléments en béton.

1.3.5. Résistance à l'abrasion :

La résistance à l'abrasion est une propriété de la surface du béton permettant de résister à l'usure. L'abrasion du béton est généralement engendrée par :

- une circulation de véhicules avec un contact plus ou moins agressif. Ces véhicules peuvent être légers ou lourds avec des surfaces de contact d'agressivités variables (pneumatiques ou Chenilles).
- l'action répétée d'eau véhiculant des granulats. Cela peut être le cas des digues, des ouvrages maritimes exposés, des pieux dans un courant important, ou des déversoirs

de barrages, ou plus généralement tout béton soumis à une circulation d'eau chargée en particules abrasives.

- l'exploitation de l'ouvrage peut aussi générer des frottements réguliers. C'est le cas des quais de chargements qui subissent le frottement répété des amarres des bateaux et des défenses d'accostage.

Pour déterminer les propriétés de résistance à l'abrasion du béton, on soumet une éprouvette du béton à l'impact de sable de silice entraîné par l'air. Les lacunes de surface du béton soumise à l'usure sont ensuite évaluées et l'aptitude du béton à résister contre l'abrasion est estimée.

Pour analyser la dureté du béton in situ, on utilise le test de Rebond qui est un essai non destructif consiste à évaluer la résistance aux chocs d'une structure en béton. Pour réaliser ce test, un instrument dénommé marteau de Schmidt ou scléromètre est utilisé. Le scléromètre contient une masse, qui est tendue par un ressort puissant et vient frapper la surface du béton, produisant un rebond mesuré par l'instrument.

1.3.6. Résistance au feu :

Le béton est un matériau qui possède un bon comportement lorsqu'il est soumis à des hautes températures, car il présente une inertie à la propagation du flux de chaleur dans sa masse, et la température ne s'y élève que lentement. La conductivité thermique d'un béton courant, soit son aptitude à transmettre le flux de chaleur, est très faible (1,5 W/mK en moyenne), ce qui lui vaut d'être classé Incombustible. Malgré ce bon comportement face à un incendie, les performances du matériau peuvent être plus ou moins affectées en fonction de :

- * la température maximale atteinte ;
- * la durée de l'incendie ;
- * la composition du matériau et sa microstructure (porosité, rapport eau/ciment, nature du liant, air entraîné, nature des granulats).

Tableau 1.2. Comportement du béton en fonction de son échauffement.

Température	Phénomène
Jusqu'à 80 °C	Départ de l'eau libre.
À partir de 80 °C	Une partie de l'eau adsorbée s'échappe du béton. Début de la perte de l'eau de constitution de certains hydrates (notamment l'ettringite). L'eau liée chimiquement commence donc à s'évaporer du béton.
Jusqu'à environ 300 °C	Première étape de déshydratation des silicates de calcium hydratés (C-S-H).
Entre 450 et 550 °C	Décomposition de la portlandite en chaux libre selon la réaction : $\text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.
573 °C	Transformation allotropique du quartz α en quartz β accompagnée d'un phénomène de dilatation (fissuration des granulats siliceux).
600 - 700 °C	Décomposition des phases C-S-H et formation de β -C ₂ S. Il s'agit de la deuxième étape de déshydratation des C-S-H qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques (C ₂ S).
700 - 900 °C	Le carbonate de calcium se décompose en libérant de la chaux : $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (décomposition des calcaires).
À partir de 1100 - 1200 °C	Formation de wollastonite β (CaO.SiO ₂). Début de la fusion de certains agrégats et de la pâte de ciment. Remplacement au cours de l'échauffement des liaisons hydrauliques par des liaisons céramiques (phénomène de frittage).

Au cours de l'incendie, la température atteint fréquemment 1000 °C en surface des éléments de la construction. Plusieurs phénomènes physico-chimiques se succèdent lorsque la température du béton évolue de 100 à 1 000 °C et plus (tableau 1.2). Ils correspondent à des modifications sensibles de la pâte cimentaire et des granulats à partir de 500 °C, modifications qui se traduisent par un affaiblissement des qualités du béton (résistance mécanique, modules de déformation, etc.).

Les évolutions et les altérations du béton en cas de hausse de température se traduisent par un affaiblissement de la résistance à la compression du matériau. La résistance reste constante jusqu'à 250 °C puis décroît pour ne plus représenter à 600 °C que 45 % de ce qu'elle était à 20 °C; elle devient nulle à 1000 °C. La figure 1.14 présente les résultats d'essais montrant la décroissance pratiquement linéaire de la résistance d'un béton courant à partir de 250 °C. Le fuseau autour de la courbe moyenne exprime principalement les différences de valeurs obtenues suivant la nature des granulats. Les bétons de granulats siliceux se situent en partie basse du fuseau alors que les bétons de granulats calcaires, résistant mieux à la température, en occupent la partie haute.

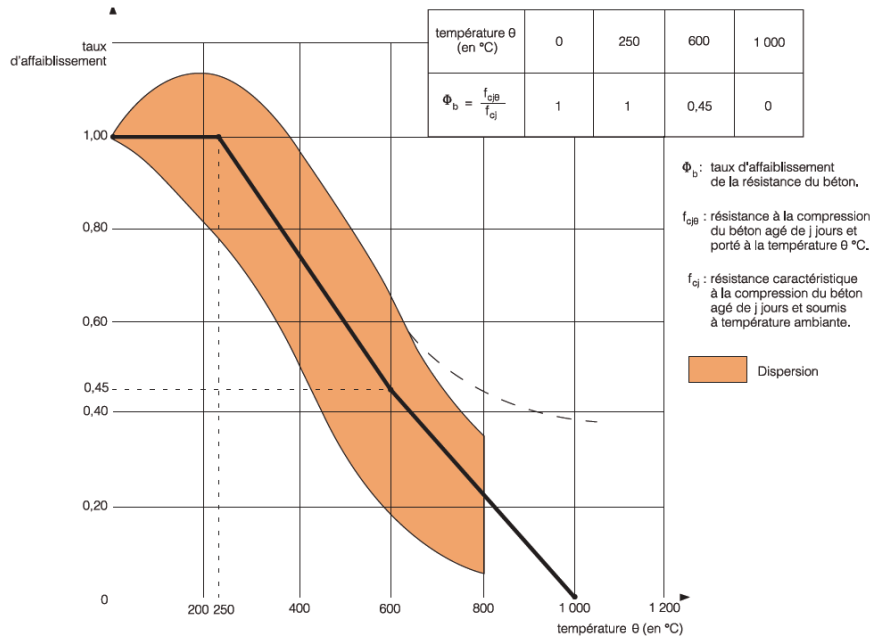


Figure 1.14. Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température.

1.3.7. Déformations différées :

1.3.7.1. Retrait :

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles de celui-ci en l'absence de chargement, dans une ambiance thermodynamique constante. Ces variations dimensionnelles mettent en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise du béton. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par un ferrailage approprié et par des joints, ces variations dimensionnelles engendrent des contraintes de traction qui peuvent générer des fissures dans le béton. Les fissures dues au retrait ne doivent pas être confondues avec les fissures liées à la fonctionnalité des ouvrages (dus aux sollicitations appliquées). La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton. Le retrait du béton dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation.



Figure 1.15. Ouverture importante des fissures de retrait

Il existe cinq types de retrait dans le béton qui sont :

- **Retrait plastique :** il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage du béton par évaporation, alors qu'il est encore à l'état plastique et donc déformable. Ce retrait particulier de séchage a lieu pendant un temps limité, avant et pendant la prise. La contraction apparaît une fois que le béton a été mis en place, et que la surface libre est soumise au séchage. Le retrait plastique est piloté par la vitesse de séchage. L'ordre de grandeur du retrait plastique des bétons est de 1 mm/m dans des conditions courantes et peut atteindre plusieurs mm/m lorsque les conditions sont défavorables.
- **Retrait de dessiccation (de séchage):** c'est le plus connu. Il se développe dans le béton au cours de son durcissement, pendant les premiers mois. Il est plus important en surface que dans la masse du béton. C'est un retrait du béton durci causé par l'évaporation de l'eau contenue dans la porosité du béton, à partir des surfaces libres soumise à l'air ambiant ayant un degré d'humidité inférieur à celui du béton. Ce processus de séchage génère une diminution de volume du béton. La perte d'eau est progressive et décroissante au cours du temps. Les facteurs qui influencent l'amplitude le retrait de séchage sont la porosité du béton, le degré hygrométrique de l'air ambiant, et le rapport surface exposée à l'air/volume de l'élément.

Le mécanisme de fissuration du retrait de séchage commence toujours à se développer au niveau de la surface du béton exposée à l'air sec. Au cours de séchage, les forces de traction, qui apparaissent près de la surface sont équilibrées par des forces de compression intérieures au béton. Des fissures s'ouvrent dès lors que les efforts de traction dépassent la résistance à la traction du béton. Ces efforts de traction étant libérés chaque fois que la partie extérieure du béton se fissure.

- **Retrait endogène (d'autodessiccation):** il se produit dans le béton en cours de durcissement par suite du développement des réactions chimiques d'hydratation entre le ciment et l'eau. La consommation d'eau résultant de l'hydratation du ciment conduit à la diminution de l'humidité interne. L'eau est consommé, le réseau poreux est donc vidé et le béton se dessèche et donne lieu à des contractions. Ce retrait est un phénomène normal, inévitable, inhérent à la nature même du ciment. Il est irréversible et continue d'augmenter pendant plusieurs mois tant que l'hydratation du ciment se prolonge. Son intensité est proportionnelle au dosage en ciment. Il varie entre 300 et

800 $\mu\text{m}/\text{m}$ selon la formulation. Dans les bétons de rapport $E/L > 0,42$ le retrait endogène est négligeable comparativement au retrait de séchage. Cependant dans les bétons de rapport $E/L < 0,42$ le retrait endogène peut représenter près de la moitié du retrait total développé. Contrairement au retrait plastique et retrait de séchage, le retrait endogène se développe sans perte de masse et de façon isotrope dans toute la masse de l'élément de béton qui durcit et il se manifeste principalement par de petites fissures dans la masse du béton même.

- **Retrait thermique :** l'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur qui, surtout dans le cas de constructions massives, ne peut être évacué rapidement. Cela donne lieu à des gradients de température qui peuvent éventuellement encore être accentués en raison de la réaction d'hydratation accélérée à température plus élevée. Des contraintes de compression au centre et de traction aux extrémités s'accumulent dans l'ouvrage en béton qui finit par se fissurer. Durant la période de refroidissement ultérieure, des fissures peuvent également se produire lorsqu'un obstacle extérieur empêche le retrait de l'élément. Ce type de retrait ne concerne que les pièces massives, d'épaisseur supérieure à 60 cm
- **Retrait chimique :** le retrait chimique est la conséquence des réactions d'hydratation, car les produits de ces réactions ont un volume plus faible. En effet, le volume des hydrates formés lors de la prise du ciment est d'environ 20 % plus faible que le volume du ciment anhydre et de l'eau de départ. une contraction d'origine chimique se prolonge tout au long de l'hydratation des grains anhydres. Des microfissures apparaissent dans la structure, mais à l'endroit des parements la déformation est presque inexistante.

Le retrait du béton est évalué en mesurant la variation de la longueur entre deux faces opposées d'éprouvettes prismatiques de béton durci équipées de plots. La mesure se fait à l'aide d'un appareil spécifique muni d'un comparateur 'rétractomètre'. Pendant toute la durée de l'essai, les éprouvettes sont conservées en laboratoire en conditions régularisées (généralement à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$).



Figure 1.16. Mesure de retrait du béton par rétractomètre.

1.3.7.2. Fluage :

Le fluage du béton est une déformation différée supplémentaire à la déformation élastique provoquée par l'application d'un chargement à une pièce en béton. En effet, lorsqu'on applique une charge permanente à une structure en béton, elle subit une déformation instantanée au moment du chargement, qui est suivie par une déformation différée (qui se prolonge au cours du temps). Cette déformation différée est appelée fluage. Les déformations différées générées par le fluage sont irréversibles et peuvent mettre en cause la durabilité des ouvrages.

Durant la première année de service, les déformations de fluage peuvent atteindre deux à trois fois celle causée par la déformation élastique. Le fluage n'affecte pas la résistance du béton, à moins que la structure soit soumise à des contraintes soutenues très élevées, soit de l'ordre de 85 à 90% de la résistance ultime. Cependant, le fluage affecte principalement les flèches des éléments des structures alors qu'il affecte la distribution des contraintes dans celles où les mouvements sont empêchés. En plus, le fluage affecte la mise en tension des câbles de précontrainte et causera des pertes de précontrainte.

Sous chargement constant, le phénomène de fluage peut évoluer suivant trois phases (figure 1.17). Cette évolution est principalement fonction du niveau et de la durée de chargement. Dans la première phase, la vitesse de déformation décroît avec le temps, ainsi le fluage primaire tend à se stabiliser après une certaine durée de temps de chargement. Dans la deuxième phase, la vitesse de déformation reste constante, ce qui caractérise le fluage secondaire. Dans la phase de fluage tertiaire, la déformation évolue avec une vitesse croissante entraînant la rupture imminente de la structure chargée. Ce phénomène de rupture est mis en évidence à partir de 80% de la limite de rupture dans le cas de la compression et à partir de 70% dans le cas de la traction.

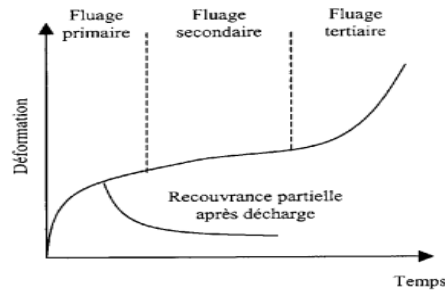


Figure 1.17. Mesure de retrait du béton par rétractomètre.

Plusieurs paramètres influencent le fluage tels que :

- **la valeur de la charge appliquée** : Il y a une proportionnalité directe entre le fluage et la contrainte appliquée, il n'y a pas de limite inférieure à cette proportionnalité du fait que le béton subit un fluage sous de très faibles contraintes, alors que la limite supérieure de la proportionnalité est atteinte lorsque se développe une importante microfissuration.
- **la composition du béton** : le dosage en eau a un effet sur le fluage car une partie de celle-ci est générée par la redistribution d'eau dans les pores capillaires. Aussi, un béton contenant un faible dosage en granulats est moins sensible au fluage. En effet, seule la matrice cimentaire est responsable des déformations différées du béton (les granulats ont un comportement élastique, donc ne fluent pas). Enfin, le type et le dosage en ciment influencent le fluage dans la mesure où il a un effet sur la résistance du béton au moment de l'application de la charge. La finesse du ciment affecte le développement de la résistance au jeune âge et influence même le fluage.
- **caractéristiques mécaniques du béton** : en particulier son module d'élasticité. Les valeurs de fluage diminuent avec l'augmentation des propriétés mécaniques du béton ;
- **les conditions ambiantes (température, taux d'humidité)** : l'humidité relative de l'air ambiant est l'un des paramètres externes qui a le plus d'influence sur le fluage. Le fluage pour un béton donné est d'autant plus important que l'humidité relative est basse. Aussi, le taux de fluage augmente avec la température jusqu'à environ 70°C.
- **l'âge auquel est appliquée la charge** : plus le béton est chargé tardivement, moins il flue.

Dans les études, on distingue deux types de fluage :

- **le fluage endogène ou fluage propre** : Le fluage propre du béton est conventionnellement la part de déformation différée d'un béton chargé sous une contrainte constante et protégé de la dessiccation. Ce type de fluage se produit à

court terme correspondrait à un mécanisme de diffusion et redistribution de l'eau libre dans l'espace capillaire du béton. L'eau participerait alors au mécanisme d'équilibre du matériau car elle pourrait reprendre des contraintes. À plus long terme, ce fluage endogène pourrait être dû aussi à une déformation et à un mécanisme de glissement des feuilletts C-S-H de type dislocation (figure 1.18).

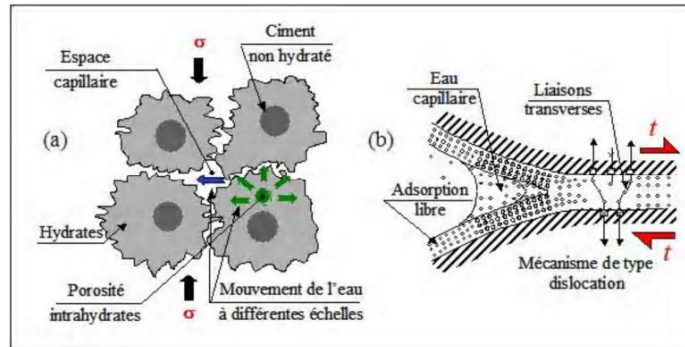


Figure 1.18. Mécanismes physiques à l'origine du fluage propre
a) à court terme ; b) à long terme

Le fluage propre est évalué en mesurant les déformations dans le temps d'une éprouvette chargée à l'instant t_0 en partant d'un état hydrique et thermique uniforme gardé constant tout au long de l'essai. Cette déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée pour des niveaux de chargement inférieurs à 50% de la charge ultime.

La figure 1.19 montre que l'eau joue un rôle essentiel dans le mécanisme de fluage propre. Les différents essais de fluage propre montrent une réponse quasi proportionnelle à l'état hydrique uniforme de l'éprouvette. Plus l'humidité relative uniforme d'un béton préalablement sèche est basse, plus sa déformation de fluage propre est faible.

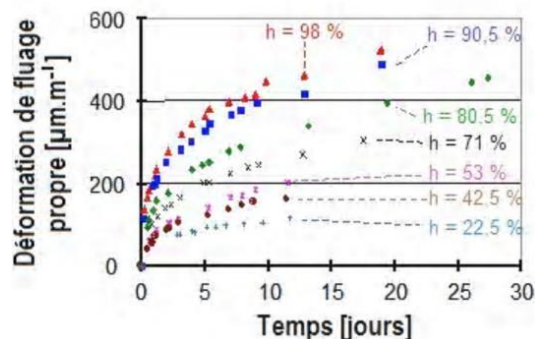


Figure 1.19. Fluage propre en fonction de l'état hydrique interne du béton.

On obtient la valeur de fluage propre en laboratoire en protégeant le béton de la dessiccation et en mesurant en parallèle la composante de retrait endogène. On définit

alors la complaisance telle que la déformation mécanique (soit déformation totale moins le retrait)

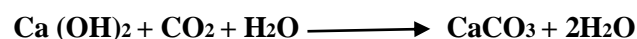
- **le fluage de séchage ou fluage de dessiccation** : Le fluage de dessiccation pourrait être dû à une déformation complémentaire due au retrait de dessiccation. Le phénomène de séchage génère des déformations empêchées et peut induire des fissurations suivant l'échelle de la structure. L'application d'une charge de compression peut induire une fermeture totale ou partielle des fissures et augmenter ainsi la déformation totale du fluage.

1.3.8. Propriétés essentielles de durabilité :

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses provenant du milieu ambiant (agressivité des eaux, des sols et de l'atmosphère) tout en conservant ses performances au cours de sa durée d'utilisation. Pendant longtemps, les critères de durabilité du béton étaient liés aux performances mécaniques requises à 28 jours associées éventuellement à un dosage minimum en ciment. Cependant, de nombreux phénomènes peuvent nuire à la durabilité du béton, ces phénomènes sont exercés par l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage.

1.3.8.1. Résistance à la carbonatation :

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 :



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures. Le processus de corrosion s'amorce alors.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

La carbonatation est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de dépassivation des armatures. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont donc les paramètres déterminants pour la diffusivité du dioxyde de carbone.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important : la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

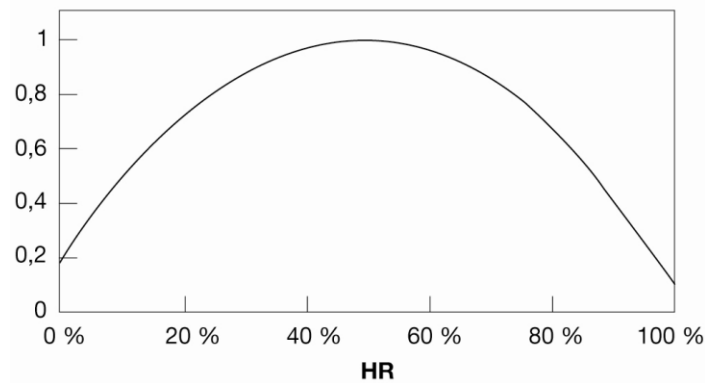


Figure 1.20. Evolution de la carbonatation en fonction de l'humidité relative.

1.3.8.2. Résistance aux ions chlorures et aux ions sulfates :

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer la corrosion des armatures. Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par gonflement une poussée sur le béton d'enrobage qui se traduit

par une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage, formations de fissures, et diminution de l'adhérence acier-béton. Pour éviter les dégradations liées aux attaques chimiques par les ions chlorures, le béton doit être compact, homogène et résistant. L'enrobage des armatures doit être aussi assuré selon le degré de l'agressivité du milieu.

Les ions sulfates peuvent aussi pénétrer à l'intérieur du béton à travers la porosité ouverte du béton, et se réagissent avec les aluminates C_3A du ciment. Le produit de cette réaction est l'ettringite (trisulfoaluminate de calcium) qui est un hydrate contenant des sulfates dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle. C'est pourquoi, des précautions particulières sont prises lorsqu'un béton est exposé à un environnement riche en sulfates, notamment vis-à-vis des caractéristiques chimiques du ciment.

1.3.8.3. Résistance au gel - dégel :

Comme tout matériau contenant de l'eau, le béton durci peut être dégradé par le gel car il contient une certaine proportion d'eau libre dans sa porosité capillaire. Lorsque la température du béton descend en dessous de $0^{\circ}C$, cette eau, contenue dans les pores les plus grands, peut geler avec une augmentation de volume (de l'ordre de 9%) et mettre en pression le béton d'où risque de fissure. Ce mécanisme n'est pas la seule cause de la dégradation du béton. En effet, Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restant à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée, ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée (présente dans les capillaires fins), qui est considéré comme la cause principale de dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment, si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton. Les deux conséquences sont :

- La microfissuration de la pâte de ciment dans la masse du béton.
- L'écaillage du béton en surface (délitage). Cela se traduit par des décollements de petits éléments superficiels comme des écailles de poisson d'où le nom d'écaillage donné à ce phénomène.

Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel. Les dégradations de gel interne ne se produisent pas lorsqu'il existe dans le béton un réseau de petites bulles d'air, dense et homogène, permettant le déplacement de l'eau ou lorsque la quantité d'eau gelable est suffisamment faible.



Figure 1.21. Fissuration du béton sous l'action de gel

1) eau interne à l'état liquide ; 2) fissuration par pression d'eau gelée.

Pour empêcher l'apparition de pressions excessives dans le béton, il est possible de créer, grâce à un adjuvant entraîneur d'air, un réseau de bulles qui doivent être nombreuses, de petites dimensions, bien réparties et suffisamment rapprochées. Le respect de la quantité d'air entraîné dans un béton n'est pas suffisant pour garantir sa résistance au gel, il faut créer un véritable réseau de bulles d'air. Leurs dimensions ne doivent pas dépasser quelques dizaines de microns. Leur espacement, qui détermine le niveau de pression, proportionne au trajet parcouru par l'eau pour atteindre le front de gel le plus proche, doit être inférieur à une valeur seuil de l'ordre de quelques centaines de microns. Ce réseau de bulles va permettre les mouvements de l'eau et la formation de glace sans préjudice pour le matériau.

1.3.8.4. Phénomène Alkali réaction :

Le phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau. Il correspond à un ensemble de réactions chimiques complexes qui peuvent se déclencher entre certaines phases minérales contenues dans les granulats et la solution interstitielle fortement basique du béton, lorsque plusieurs conditions sont réunies simultanément : présence d'une forme de silice des granulats dite « potentiellement réactive », des alcalins du béton et de l'eau en quantité suffisante.

Il s'agit de réactions internes au béton mettant en jeu essentiellement les éléments présents à l'origine dans le béton et un apport d'eau externe. En l'absence de précaution, cette pathologie peut apparaître dans les parties d'ouvrages les plus sévèrement exposées à

l'humidité, en général au bout de quelques années (voire plusieurs dizaines d'années). On observe la formation d'un gel gonflant qui peut provoquer, en particulier, au cœur du béton, des déformations et une microfissuration du matériau. Les contraintes expansives génèrent, si elles dépassent la résistance en traction du béton, un décollement à l'interface pâte-granulats et la formation de microfissures à l'interface béton-armatures qui se matérialisent en surface par une fissuration orientée selon la direction des aciers.

1.4. Conclusion

Les bétons sont des matériaux composites minéraux obtenus grâce au mélange d'un liant, d'eau et de granulats. Le comportement du béton évolue avec le temps. Avant la prise et le durcissement, le béton possède la capacité de s'écouler, de se déformer, et de remplir des coffrages d'une plus ou moins grande complexité. Quand il se durcit, le béton présente des propriétés mécaniques et une durabilité intéressantes qui accroîtraient son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, et des centrales nucléaires.

Chapitre 02 : Bétons à hautes performances (BHP)

2-1- Introduction

La découverte de superplastifiants très performants a conduit à une véritable évolution dans le domaine de formulation du béton. En effet, l'action de ces adjuvants sur la demande en eau du béton a créé la base du développement des bétons à hautes performances, dont les applications se retrouvent principalement dans le secteur du béton préfabriqué. Les bétons à hautes performances présentent une durabilité améliorée et une résistance accrue. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées.

2-2- Définition d'un béton à hautes performances

Un béton à hautes performances (BHP) est un béton dont la résistance mécanique moyenne à la compression à l'âge de 28 jours est supérieure à 50MPa sur cylindre et un rapport (Eau efficace/liant équivalent) inférieur à 0,4. La résistance à la compression peut atteindre des valeurs supérieures à 100MPa pour les bétons à très hautes performances (BTHP) et supérieures à 150MPa pour les bétons fibrés à ultra hautes performances (BUHP).

Due à l'utilisation des additions minéralogiques (Fumée de silice, cendres volantes, laitier de haut fourneau) et des adjuvants fluidifiants, les BHP se caractérisent par une très haute compacité, une facilité de mise en œuvre et une durabilité accrue.

2-3- Histoire des BHP :

Dans les années 1940, on sait que pour obtenir un béton de bonne qualité, il faut minimiser le pourcentage de vides. Mr Duriez précise ainsi qu'il convient d'aboutir à une ossature dont la surface spécifique soit minimale tout en donnant un béton homogène de faible porosité qui soit en place avec le dosage en ciment prescrit et le minimum d'eau nécessaire au mouillage de tous les grains. Dans les années 1980, on découvre le moyen de réduire ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants.

Avant 1980, les BHP étaient uniquement produits en laboratoire. Cette situation a beaucoup évolué vers les années quatre-vingt, avec l'arrivée des superplastifiants et des fumées de silice. En effet, vers 1970, les restrictions environnementales ont contraint les industries de ferro-silicium à collecter la poussière de leurs cheminées. Comme conséquence, ces fumées se sont retrouvées dans l'industrie du béton. De résistance en compression de l'ordre de 50 MPa,

les BHP ont été utilisés pour la première fois en 1984 dans la construction d'un petit pont. De nos jours, la production de bétons de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 100 MPa est très fréquente dans bons nombres de laboratoires dans le monde et leur utilisation sur les chantiers a commencé à se développer.

2-4- Composition d'un BHP :

Pour formuler un BHP ayant une bonne maniabilité, une résistance à la compression élevée et une durabilité accrue, le choix de type et dosage des constituants rentrant dans la composition de ce béton doit répondre à certains critères.

2-4-1- Ciment :

La pate de ciment jouant le rôle d'une matrice de liaison entre les granulats constitue 25 à 40% du volume total du béton. Le ciment utilisé dans la fabrication d'un BHP doit lui permettre d'atteindre une classe de résistance donnée tout en assurant une bonne maniabilité, une bonne durabilité et une finesse accrue. Les BHP de classe de résistance 50-75MPa peuvent être fabriqués avec la plupart des ciments portlands commerciaux ayant des résistances caractéristiques de 42.5 et 52.5MPa. Cependant, les BHP de la gamme 75-100 MPa ne peuvent être fabriqués qu'avec certains ciments, et rares sont les ciments qui peuvent donner des BHP de classe de résistance supérieure à 100MPa. Pour pallier aux manques de performances de ciments, le recours à d'autres solutions (utilisation de superplastifiants de grande efficacité, utilisation des additions minéralogiques réactives) est nécessaire. Les principaux caractéristiques des ciments influençant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BHP sont :

- **Finesse du ciment :** la surface spécifique du ciment est une surface réactive. Plus le broyage est fin, plus les phases silicatées (C_3S et C_2S) entourant les particules sont nombreuses, ce qui augmente le rendement de la réaction d'hydratation. Les ciments ayant une grande finesse se caractérisent aussi par une bonne aptitude à améliorer la compacité du squelette granulaire du BHP. Cependant, une finesse élevée augmente la cinétique d'hydratation du ciment, impactant négativement sur la rhéologie et augmente les valeurs de retrait du BHP.
- **Teneur en C_3S :** Due à sa meilleure réactivité par rapport au C_2S qui agit sur les résistances au moyen et long terme, Les ciments ayant une teneur élevée en C_3S se caractérisent par une bonne résistance à la compression au jeune âge.

- **Teneur en C₃A** : La fabrication d'un BHP nécessite l'utilisation d'un ciment à faible teneur en C₃A pour faciliter le contrôle de la rhéologie. Une teneur réduite en C₃A améliore la durabilité du BHP en permettant une meilleure résistance aux milieux agressifs.
- **Composition de la phase interstitielle** : En raison de la diminution des gradients ioniques avec le milieu agressif, les ciments présentant un PH de la solution interstitielle faible sont plus résistants aux attaques chimiques. Pour cela, les bétons contenant une faible teneur en portlandite présentent une stabilité chimique meilleure par rapport aux ceux contenant une teneur en portlandite élevée.

2-4-2- Granulats :

Le choix des granulats rentrant dans la composition d'un BHP doit répondre aux critères suivants :

- **Nature minéralogique** : Les propriétés intrinsèques des granulats dépendent de la nature de leur roche mère. En effet, les granulats utilisés dans la fabrication du béton proviennent de roches de nature géologique d'origine détritique, sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Les granulats calcaires offrent une meilleure affinité chimique avec la pâte de ciment. Ils possèdent aussi un module de compressibilité plus proche de la pâte de ciment que les granulats siliceux. Les granulats proviennent de roches éruptives se caractérisent par une dureté élevée par rapport aux granulats calcaires.
- **Forme, dimensions et propreté** : Due à leur faible surface spécifique, l'utilisation de gros granulats conduit à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour mouiller ces granulats et par conséquent conduit à l'augmentation de la résistance. Cependant, il n'est pas recommandé d'utiliser ce type de granulats dans la formulation des BHP car ils se comportent comme des inclusions rigides induisant des systèmes d'auto-contraintes importants. Ils empêchent les déformations différées de la matrice cimentaire, qui conduit à la fissuration. Ces risques de fissuration sont limités tant que la dimension maximale est inférieure à 10-12mm.

Les formes anguleuses des granulats concassés assurent une bonne adhérence entre la pâte du ciment et les granulats et permet d'obtenir un meilleur

comportement mécanique. Cependant, une forme très angleuse ou plate conduit à l'augmentation du dosage en eau.

Le granulat idéal doit être concassé, propre, de forme cubique avec une angularité réduite et contenant le moins possible de particule plates ou allongées.

- **Dosage en granulats :** Le volume de granulats possède un effet sur le comportement mécanique du BHP. En effet, les propriétés mécaniques (résistances mécaniques, module élastique) et les déformations différés (retrait et fluage) s'améliorent en augmentant le volume des granulats dans la composition du BHP.

Pour obtenir une très bonne compacité, la distribution granulaire du BHP doit être aussi optimisée et le dosage de chaque classe granulaire doit être adapté pour obtenir une porosité minimale du squelette granulaire qui conduit à l'amélioration de comportement rhéologique, mécanique et durabilité du BHP.

2-4-3- Additions minérales :

Les additions minérales utilisées dans la composition du BHP sont des matériaux finement broyés de granularité inférieure à 100 µm. Elles sont incorporées dans la composition du BHP lors de sa fabrication pour améliorer certaines de ses propriétés (ouvrabilité, résistances mécaniques, durabilité, compacité). Les additions minérales sont utilisées aussi pour réduire le cout de fabrication du béton. Parmi les additions minérales les plus utilisées dans la fabrication des BHP on trouve :

- Les fumées de silice
- Les cendres volantes
- Le laitier de haut fourneau broyé
- Les fillers calcaires

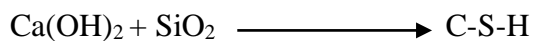
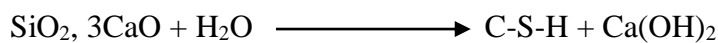
Dépend de la nature chimique et la finesse de l'addition utilisée, la réactivité des additions minérales peut avoir trois effets différents :

- **Effet filler ou effet de remplissage :** la zone de transition entre la pate de ciment et les granulats qui joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton demeure poreux. L'ajout des additions minérales ultrafines permet de combler la porosité de cette zone.

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, l'ajout d'une addition minérale modifie aussi le squelette granulaire qui peut

compenser un déficit en particules fines. Ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans les zones les plus fines. Le squelette granulaire se trouve alors optimisé par le remplissage d'une partie de volume des vides. Cela conduit à l'augmentation de la compacité et l'amélioration de la résistance et la durabilité du BHP. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité

- **Effet chimique (hydraulique ou pouzzolanique):** l'activité chimique est le résultat d'une réaction chimique entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. La réaction pouzzolanique est une réaction entre la silice qui se trouve dans des additions (comme les cendres volantes et les fumées de silice) et la portlandite produite par la réaction d'hydratation du ciment selon la réaction chimique :



Cette réaction donne des nouveaux C-S-H et conduit à l'augmentation de la résistance du béton.

- **Effet physique ou de surface :** En présence des additions de nature calcaire, la vitesse de la réaction d'hydratation s'améliore et conduit au développement des résistances à court terme. Cet effet est désigné sous le terme de l'effet de germination hétérogène.

2-4-4- Adjuvants:

La maniabilité des bétons classiques dépend essentiellement du dosage en eau. Malheureusement, l'augmentation de la teneur en eau conduit à la modification des propriétés du béton : à long terme, chute des résistances mécaniques, porosité accrue et donc durabilité réduite ; à court terme, ségrégation accrue et perte d'homogénéité du matériau.

La formulation d'un BHP résistant et durable exige la réduction du rapport eau/liant. L'utilisation d'un adjuvant réducteur d'eau capable de diminuer la tendance de floculation des particules de ciment est la solution la plus efficace qui conduit à la réduction de la quantité d'eau de gâchage tout en gardant une maniabilité convenable à l'état frais. Grâce à son pouvoir dispersant, Ils permettent de défloculer les grains de ciment ayant tendance à se regrouper en grappes une fois introduits dans l'eau en réduisant les frottements entre les

grains de ciment. Leur rôle est donc essentiellement de modifier l'équilibre des forces existant entre les particules de ciment. Les superplastifiants rendent possible la confection d'un BHP ayant un rapport eau/liant inférieur à 0.30. La taille et le volume de pores sont ainsi réduits, rendent la pâte de ciment plus dense et conduit la l'amélioration de la résistance et la durabilité du BHP.

2-5- Principes de formulation d'un BHP :

Le problème de la formulation d'un BHP est plus complexe car le nombre des composants qui sont susceptibles d'être incorporés dans la composition de ce type de béton devient plus grand (superplastifiant, fumées de silice, cendres volantes...).

En générale, la formulation d'un BHP se base sur les principes suivants :

- Augmentation du dosage en ciment
- Réduction du rapport E/C
- Extension du squelette granulaire par l'utilisation des additions fines et ultrafines.

La composition d'un béton hautes performances est en général la suivante : 750 à 950 kg/m³ de gravillons, 700 kg/m³ de sable, 350 à 500 kg/m³ de ciment de classe 52.5 N ou R et d'une addition "fumée de silice généralement". L'ajout d'un "superplastifiant/haut réducteur d'eau" à hauteur de 1 à 2 % du poids de ciment permet de réduire le volume d'eau nécessaire à une valeur de 140 à 160 litres/m³.

Le tableau 2.1 montre les dosages des constituants d'un BHP.

Tableau 2.1. Dosages des composants d'un BHP en kg.

Graviers concassés			Sable concassé	Ciment 52.5	Eau	Superplastifiant	Fumée de silice	E/C
854	411	326	326	421	112.3	7.59	42.1	0.27

2-6- Propriétés des BHP :

2-6-1- Maniabilité :

Malgré des dosages en eau très inférieurs aux dosages usuels, ces bétons présentent le plus souvent un affaissement au cône d'Abrams d'environ 20 cm en sortie de malaxeur. La séparation des particules permise par les superplastifiants supprime en effet le seuil de cisaillement de la pâte de ciment fraîche, d'ou un béton qui s'écoule sous le seul effet de la

pesanteur, avec cependant une vitesse dépendante de la viscosité du mélange, c'est-à-dire du degré de desserrement de l'empilement granulaire par l'eau de gâchage. Pour des rapports eau/ciment inférieur à 0.30, la consistance, bien que fluide, est souvent visqueuse et collante. Le béton se met bien en place, mais nécessite pour cela une vibration comparable à celle de bétons courants de consistance plastique. Au décoffrage, un certain bullage apparaît parfois, conséquence de la viscosité du matériau frais.

Le maintien de la maniabilité peut être de courte durée, si on n'a pas anticipé sur ce problème lors de la formulation. L'obtention d'une durée pratique d'utilisation supérieure à une heure est cependant tout à fait possible (Figure 1-15), en utilisant éventuellement un retardateur de prise, lorsque, par exemple, le ciment contient des aluminates en proportion importante.

2-6-2- Chaleur d'hydratation :

En raison de la teneur élevée en ciment, le dégagement de chaleur durant le processus de l'hydratation du ciment est plus important dans le béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire. Cette élévation importante de température doit être prise en compte lors de la conception du projet. Les risques liés au retrait et à la fissuration thermique doivent être évalués. Des mesures visant à éviter le retrait thermique doivent être prises (choix de type de ciment, temps de coulage, utilisation des additions).

2-6-3- Résistance à la compression :

Due aux dosages élevés en ciment et des faibles rapports E/C, la cinétique de durcissement est plus rapide dans le cas des BHP. Cela conduit à une augmentation rapide des valeurs de résistance à la compression au jeune âge.

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage. Contrairement aux bétons ordinaires, Les bétons à hautes performances se caractérisent par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice. L'apparition et le développement de fissures d'adhérence sont donc retardés. En outre, la résistance de la matrice et des granulats est proche. La rupture se fait donc par une fissuration traversant la matrice et les granulats. Mais dès l'atteinte de la résistance de rupture, la portance tendra très rapidement vers une valeur nulle. C'est ce qu'on appelle un comportement de rupture fragile (Figure 2.1).

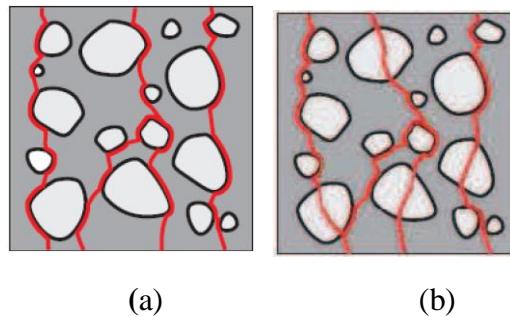


Figure 2.1. Mode de rupture dans : a) béton ordinaire b) BHP

2-6-4- Résistance à la traction :

Généralement, la résistance à la traction est liée à la résistance en compression. Cependant, le gain de résistance à la traction est moindre dans le cas d'un BHP. Un Béton ordinaire de résistance à la compression de 30-35 MPa aura un rapport de 1/10 entre la résistance à la compression et la résistance à la traction alors qu'un BHP de résistance à la compression de 80-95 aura un rapport de 1/15. La résistance à la traction des BHPs peut être améliorée par l'ajout de fibres.

2-6-5- Module élastique :

Grace à la compacité et la résistance à la compression élevées, les BHP ont des modules élastiques élevées par rapport aux bétons ordinaires. Les valeurs du module élastique des BHP allant de 37 à 45 GPa alors que les bétons ordinaires ont des valeurs de 32-33 GPa.

Les courbes contraintes- déformations d'un béton normal et un béton à hautes performances sont identiques, seulement la partie descendante de la courbe pour les BHP est plus prononcée avec l'augmentation de la résistance (figure 2.2). Cette dernière constatation pénalise les bétons à hautes performances par une faible ductilité, ce qui veut dire que les BHP sont des matériaux fragiles.

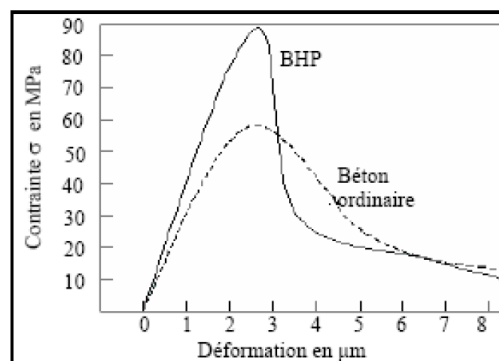


Figure 2.2. Déformation d'un BHP

La fragilité du béton caractérise sa capacité à atteindre la rupture en ne subissant qu'un minimum de déformation. Lorsque la résistance d'un BHP augmente, le caractère de ce matériau sera fragile. Ce caractère fragile, c'est à dire non ductile, pourrait être préoccupant, car les méthodes de dimensionnement modernes reposent entre autres sur les théories de la plasticité des matériaux et prennent en compte leur comportement non-linéaire. Ceci est particulièrement vrai pour les structures soumises aux séismes, aux chocs ou à des déformations imposées. Cependant, les essais de rupture en flexion d'éléments en BHP armé confirment le fait que la ductilité réelle de ces éléments est équivalente à celle d'éléments en béton armé ordinaire. Le caractère fragile des bétons sous compression est éliminé par la présence:

- d'armatures longitudinales, qui permettent un report de l'effort sur l'acier évitant ainsi une rupture quasi-instantanée de l'élément.
- d'armatures transversales, qui empêchent ou retardent le flambement des armatures longitudinales lorsque la résistance du béton est épuisée.

2-6-6- Retrait :

L'évolution du comportement à la déformation au cours du temps du BHP est influencée par sa porosité réduite, son module d'élasticité et sa densité plus élevés. Les changements majeurs observés en comparaison avec le béton à résistance normale sont :

- le retrait endogène est nettement plus élevé. Cela est dû à la consommation d'eau par la réaction d'hydratation de ciment dans le mélange de BHP qui se caractérise par un fort dosage en ciment ;
- le retrait de dessiccation diminue clairement lorsque la résistance augmente. Il diminue aussi lorsque le rapport E/C diminue. En plus, dans le béton à haute résistance, la réaction chimique de la chaux Ca(OH)_2 avec la silice SiO_2 donne naissance à un silicate du calcium $\text{CaOSiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$. Ce silicate, qui remplit les pores capillaires réduit leur volume libre, ce qui évite la migration de l'eau et le séchage des gels. Par conséquent, la déformation de retrait de dessiccation est réduite.

Le retrait endogène du BHP est plus important que celui du béton à résistance normale. En revanche, son retrait de dessiccation est plus faible. Il en résulte finalement une valeur ultime de retrait plus faible que celui du béton à résistance normale.

La montée en résistance nettement plus rapide du béton à haute résistance conduit également à une augmentation rapide de la chaleur d'hydratation. Les éléments de construction entravés dans leur déformation subissent alors au jeune âge des contraintes imposées dues à la chaleur d'hydratation surmontées par le retrait endogène. Le risque de fissuration est donc plus élevé au jeune âge pour le BHP que pour le béton à résistance normale.

2-6-7- Fluage :

Le fluage du béton à hautes performances est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Aussi, la déformation due au fluage diminue lorsque la résistance augmente et atteint sa valeur finale plus rapidement.

2-6-8- Résistance au feu :

En raison de la compacité élevée des BHP, la pression de vapeur qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100°C peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100°C.

De plus, en raison des pressions de vapeur accumulées, il existe un risque d'éclatement des surfaces superficielles des bétons de classe de résistance très élevées ($\geq 80-95$ MPa). Ces risques peuvent être palliés par l'incorporation de microfibrilles polypropylènes. Ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement.

2-6-9- Durabilité :

La très faible porosité des BHP permet d'obtenir un meilleur comportement face aux agressions extérieures. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée d'eau ou de substances agressives, tels les chlorures, les sulfates, les acides, le dioxyde de carbone. Etant donnée la très faible porosité du BHP, la pénétration de l'eau ou de ces substances dans le béton est ralentie voire empêchée et le développement des processus de dégradation est fortement retardé. En effet la pénétration des molécules d'anhydride carbonique est quasiment nulle dans le cas du BHP, béton dont la compacité est bien meilleure que celle d'un béton plus ordinaire. La résistance au gel et à l'abrasion de ces bétons est également fortement améliorée.

A cause de leur très grande compacité, les BHP sont imperméable. Cette imperméabilité peut s'expliquer aussi par la présence de très nombreuses particules de ciment non hydratées avides d'eau qui arrivent à stopper la progression de l'eau vers l'intérieurs du béton tout en le rendant encore plus imperméable .

2-6-10- Microstructure :

La microstructure des bétons à hautes et à très hautes performances est très dense et globalement amorphe, et elle comporte un volume inhabituel de grains anhydres (restes de ciments non combinés par manque d'eau disponible).En plus les interfaces pâte- granulats sont peu poreux et ne pressentent pas l'accumulation de cristaux de chaux.

2-7- Domaines d'application des BHP :

Les domaines d'application des BHP sont nombreux. Parmi les quelles, on peut citer :

- Les ouvrages soumis à des fortes sollicitations mécaniques (les viaducs, les ponts des autoroutes, les structures militaires, les centrales nucléaires, aéroports, les éléments précontraints, les ouvrages élevés ou à grandes portées).
- Les ouvrages soumis aux milieux agressifs (Tuyaux d'évacuation des eaux agressives, ouvrages implantés dans des milieux marins)
- Les ouvrages de stockage (réservoirs d'eau, centres de stockage des déchets radioactifs)

2.8. Conclusion :

Les bétons à hautes performances sont des bétons qui présentent des propriétés accrues surtout au niveau de la résistance et de la durabilité. La formulation de ces bétons est effectuée en utilisant un fort dosage en ciment, l'utilisation des additions de particules ultrafines comme la fumée de silice, l'ajout d'un adjuvant superplastifiant/haut réducteur d'eau et la réduction du rapport eau/ciment. Les BHP trouvent ses applications dans les ouvrages soumis à de fortes sollicitations mécaniques. La résistance en milieu agressif conduit à les préconiser pour les travaux en milieu marin ou agressif. Enfin lorsque le béton doit être pompé sur une grande hauteur, le BHP est recommandé du fait de sa grande manœuvrabilité.

Chapitre 03 : Bétons autoplaçants (BAP)

3-1- Introduction

Les bétons autoplaçants ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores.

3-2- Définition d'un béton autoplaçant :

Le béton autoplaçant est un béton très fluide, homogène et stable qui se met en place sous le seul effet de gravité et sans énergie de compactage supplémentaire. Le BAP est capable de remplir complètement le coffrage même à travers d'une nappe d'armature dense en gardant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène dans toutes les procédures de mise en place.

3-3- Composition d'un BAP :

Les BAP se caractérisent par la présence d'une grande quantité de fines (ciment et additions). Le dosage de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) est élevé (de 330 à 400 l/m³) et joue le rôle d'écarter les granulats pour minimiser le frottement entre leurs grains. La réduction de frottement entre les granulats conduit à l'amélioration de l'étalement et de la capacité au remplissage des BAP. Elle permet aussi d'éviter les phénomènes de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes et un coût de formule trop élevé.

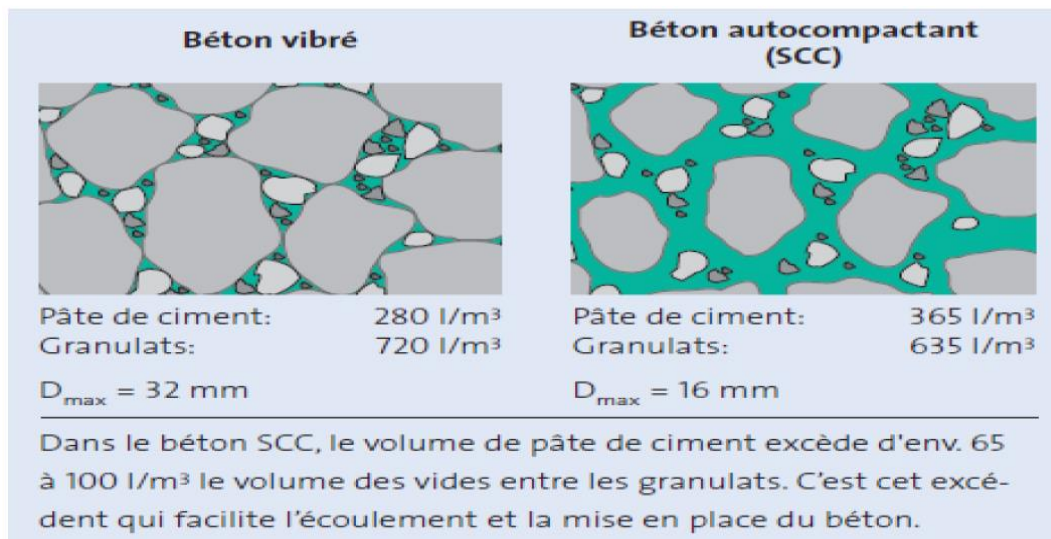


Figure 3.1. Volume de la pate dans un béton ordinaire et un BAP

3-3-1- Particularité de la composition d'un BAP :

Les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Malgré les différentes méthodes de formulation des BAP, certaines caractéristiques restent intrinsèques aux BAP par rapport aux bétons ordinaires :

- **L'emploi de superplastifiants :** La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Cela conduit à la réduction de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir les propriétés rhéologiques exigées.
- **Un faible volume de gravillon :** Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut limiter le volume de gravillon car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure 3-2).

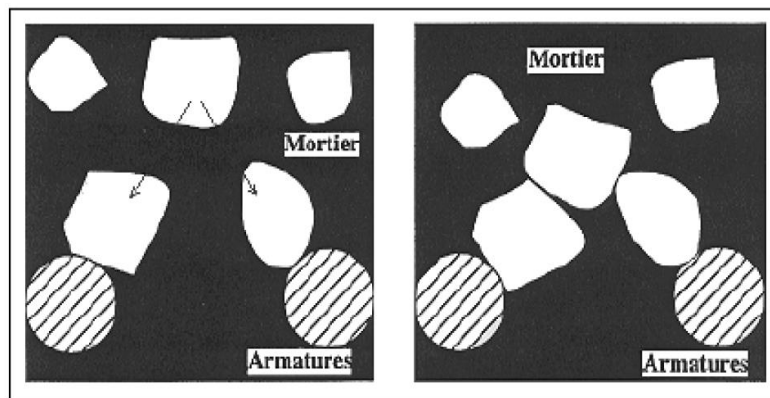


Figure 3.2. Phénomène de blocage lors de l'écoulement

Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée. Le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais lorsque les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{max} , le diamètre maximal des granulats doit être diminué.

- **L'emploi d'additions minérales:** Les interactions entre les plus gros grains des granulats doivent être réduites à travers l'augmentation de la quantité de la pâte dans la composition du BAP. Pour répondre à cette exigence, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation

du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales (cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire). Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions et leur proportion respective. Les fillers calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP.

La figure 3-3 montre les différences entre la formulation d'un béton ordinaire et celle d'un BAP.

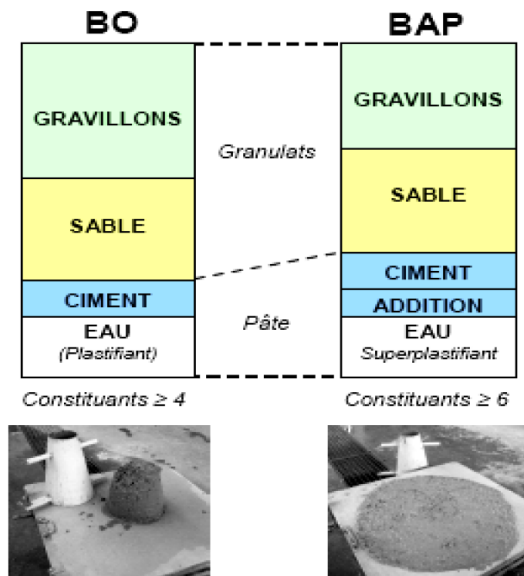


Figure 3.3. Composition d'un béton ordinaire et un BAP

3-3-2- Approches de formulation d'un BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Actuellement, deux grandes familles prévalent :

- **Une première approche** qui concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- **Une deuxième approche** qui repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent

d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

3-4- Méthodes de formulation des BAP :

La formulation des BAP se distingue des bétons ordinaires par un volume de pâte élevé (ciment + additions + eau efficace), un ajout d'une grande quantité d'addition minérale et l'emploi de superplastifiants. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent de la méthode de formulation choisie et des performances souhaitées. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaire, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons.

Pour l'optimisation de la formulation des BAP, plusieurs approches ont été conçues à savoir : L'approche japonaise, l'approche française du LCPC, l'approche suédoise, la méthode basée sur le plan d'expériences et la méthode basée sur la notion de l'excès de pâte.

L'expérience acquise ces dernières années a permis aux formulateurs de définir certaines plages pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur :

- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis, soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais de convenance effectués dans les laboratoires ou directement au centrale à béton.

Enfin, une formulation optimale d'un BAP doit assurer les exigences suivantes :

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement.

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- Le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

3-5- Caractérisation des BAP à l'état frais :

La caractérisation des BAP à l'état frais vise à étudier les trois propriétés principales suivantes :

- La mobilité en milieu non confiné
- La mobilité en milieu confiné
- La stabilité vis-à-vis la ségrégation et le ressuage

3-5-1- La mobilité en milieu non confiné :

- **Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow)**

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du BAP. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de BAP sur deux côtés perpendiculaires. Les valeurs sont relevées en millimètres (Figure 3.4).



Figure 3.4. Essai d'étalement au cône d'Abrams

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai. La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte (t50 et t60 par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 et 60 cm respectivement).

3-5-2- La mobilité en milieu confiné :

- **Essai de la boîte en L (L-Box test)**

Cet essai permet de tester la mobilité du BAP en milieu confiné et de vérifier que la mise en place de ce béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. La partie verticale de la boîte est remplie du béton qu'on laisse reposer une minute. Ensuite, on tire la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers l'espace entre les armatures. Une fois l'écoulement est terminé, on mesure le rapport $H2/H1$. Un BAP possède un taux de remplissage $H2/H1$ supérieur ou égale à 0.8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

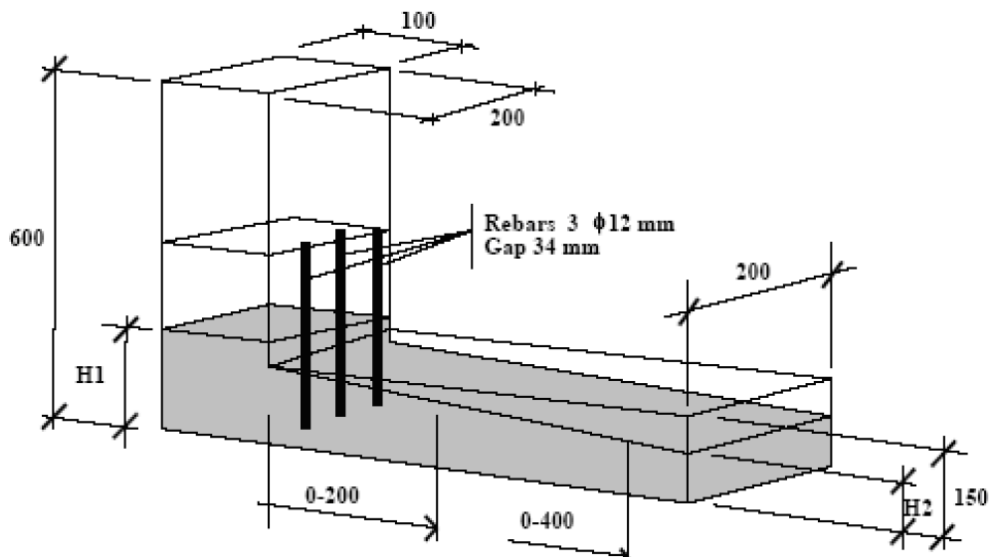


Figure 3.5. Essai de la boîte en L

- **Essai de la boîte en U (U-Box test)**

C'est un essai proche de celui à la boîte en L (L-Box). Le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L. Le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte. Une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise

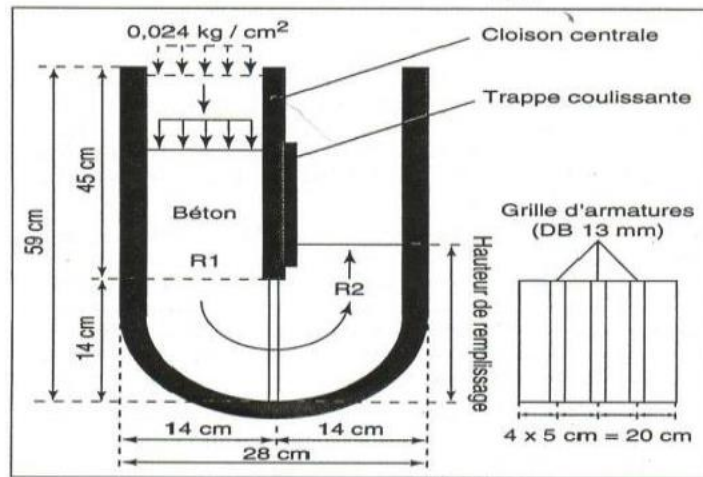


Figure 3.6. Essai de la boîte en U

- **Essai des anneaux japonais (J-ring)**

Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié. On utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (Figure 3-6). Une fois le cône rempli, on soulève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes.



Figure 3.7. Essai J-ring

Les essais du caisson et de la passoire sont moins utilisés et permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des bétons autoplaçants (Figure 3-8).

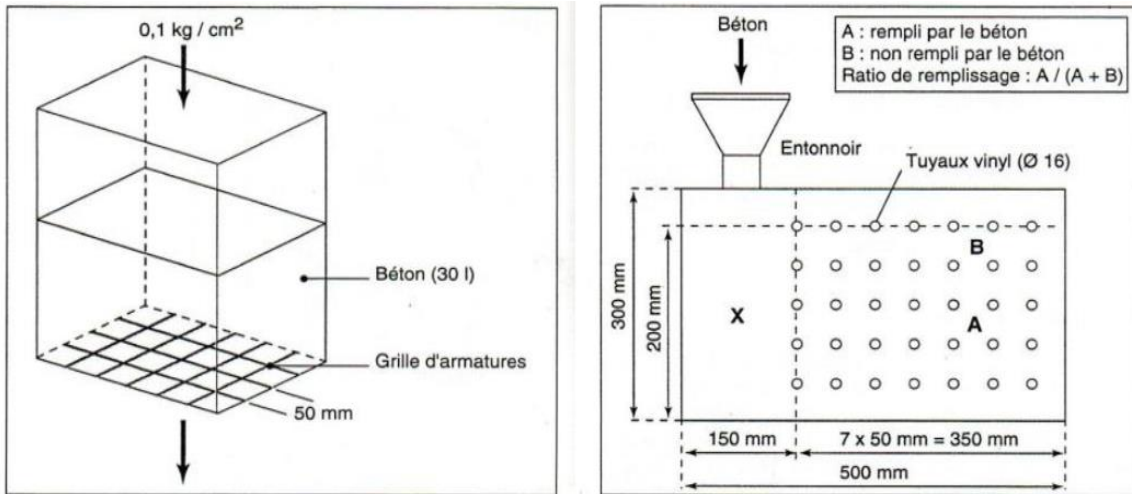


Figure 3.8. Essais de caisson et de passoire

3-5-3- La stabilité vis-à-vis la ségrégation :

- Essai de la stabilité au tamis

Cet essai 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 de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{\text{laitance}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{laitance}} < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{\text{laitance}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

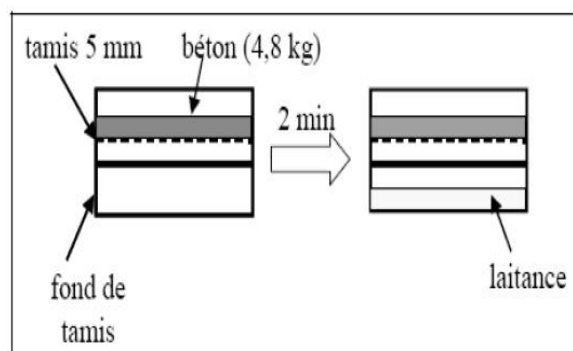


Figure 3.9. Essai de stabilité au tamis

3-6- Propriétés essentielles du BAP à l'état durci :

D'une manière générale, les comportements mécaniques et physico-chimiques sont similaires à ceux des bétons vibrés. Les BAP présentent, compte tenu de leur volume de pâte plus important, un module d'élasticité légèrement plus faible et des déformations instantanées et différées (retrait et fluage) légèrement plus élevées que les bétons traditionnels vibrés.

3.6.1. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est l'une des plus importantes propriétés du béton durci. Comparativement aux bétons ordinaires, les bétons autoplaçants suivent les mêmes évolutions de résistances à la compression ; d'ailleurs, jusqu'à l'âge de 28 jours, il n'y a pas de différence significative entre les résistances atteintes par les deux bétons confectionnés à l'aide de mêmes compositions, sauf pour le cas où le béton autoplaçant est préparé avec le même rapport E/C que le béton vibré, la résistance du BAP est meilleure.

3.6.2. Résistance à la traction :

La résistance à la traction des BAP est supérieure à celle des bétons ordinaires de l'ordre de 10%. Cela est due à :

- la qualité améliorée de l'interface pâte-granulats dans le cas des BAP ;
- la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

3.6.3. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité du béton dépend des modules de Young des différents composants et de leurs pourcentages en volume. Le module d'élasticité des BAP peut être jusqu'à 20% inférieur par rapport au béton conventionnel ayant la même résistance en compression et fabriqué par les mêmes granulats.

3.6.4. Durabilité :

Les propriétés et performances des BAP permettent d'améliorer le remplissage des coffrages même dans des conditions et des géométries délicates ou pour des éléments fortement ferrailés et de supprimer tous les risques inhérents à des défauts de vibration. Il en résulte une meilleure compacité et homogénéité des bétons durcis, qui se traduit par une plus grande durabilité des ouvrages. Les BAP, formulés avec les mêmes composants que les bétons traditionnels, sont soumis aux mêmes propriétés de transfert et mécanismes d'altération vis-à-vis des agressions externes (attaques sulfatiques, gel...) et internes (carbonatation, pénétration

des chlorures). Ils présentent donc une durabilité au moins équivalente à celle des bétons vibrés.

3-7- Avantages des BAP :

L'utilisation des BAP offre de nombreux avantages à la pratique de la construction tels que :

- Qualité améliorée des parements et bon remplissage du coffrage après la mise en place
- Possibilité de coulage dans les zones fortement ferraillées, les architectures complexes ou difficilement accessibles.
- Elimination des besoins de vibration et les nuisances sonores
- Réduction du temps de travail
- Réduction de la main d'œuvre nécessaire lors du coulage

3-8- Domaines d'application des BAP :

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton conventionnel est délicate, c'est-à-dire présentant :

- des densités de ferrailage importantes ;
- des formes et des géométries complexes : voiles courbes... ;
- des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts... ;
- des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- des voiles de grande hauteur sans reprise de bétonnage ;
- des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration
- des exigences architecturales et de qualité des parements élevées.

Aussi, l'utilisation des BAP dans les usines de préfabrication permet une amélioration de la productivité (en éliminant l'étape de serrage et de vibration), une meilleure qualité des parements (homogénéité des teintes et des textures) et la réduction des nuisances sonores

3.9. Conclusion :

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière. Ils se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs propriétés à l'état frais. En effet, les BAP présentent un comportement homogène et stable et

leur mis en œuvre ne nécessite aucune énergie de compactage. A l'état durci, ils présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels

Chapitre 04 : Bétons renforcés de fibres (BRF)

4-1- Introduction

Pour ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions. En effet, le béton a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est également peu combustible et peu toxique. Cependant, le béton présente deux caractéristiques qui limitent son utilisation, il est fragile et résiste mal à la traction. La mise au point de nouveaux produits sous forme de fibres a offert la possibilité de pallier à ces handicaps.

4-2- Définition d'un béton renforcé de fibres (BRF)

Un béton renforcé de fibres ou un béton fibré est un matériau composite associant une matrice qui est le béton et un renfort qui est les fibres. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leur forme et leurs caractéristiques mécaniques. A la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton et permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène.

4-3- Historique du béton de fibres :

Le vrai développement du béton de fibres peut être attribué à Joseph Lambot. Son brevet qui a été établi en 1847, a suggéré l'ajout des fibres continues sous forme de fils ou bandes en fils d'acier pour créer un nouveau matériau. Vingt sept ans après, l'américain A. Bernard a créé une pierre artificielle par l'ajout de granulats en fer recuit dans un mélange de béton. Ensuite, en 1899 un processus de fabrication d'éléments composites à base de ciment et d'amiante a été mis au point par Lhatshele.

En 1910 une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J. Porter qui a conclu que la présence de fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Par la suite en 1911, Graham a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Une année après, Weakly déposa un brevet qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec pour intermédiaire un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton. En 1914, le premier brevet britannique a été établi par Fickley qui a décrit d'une manière assez rigoureuse une recommandation d'inclusion dans le mélange de béton des différentes pièces métalliques

tortueuses. Il a confirmé que la résistance à la fissuration et à la fatigue a été améliorée mais il a noté aussi qu'il n'y a pas une amélioration dans la résistance du composite ni à la traction de même qu'à la compression. A l'opposé de Fickley, le français H. Alfson a rapporté dans ses travaux que la résistance à la traction d'un béton avec des petits éléments longitudinaux en fer, en bois ou autres matériaux a été améliorée. Il a suggéré également l'amélioration de l'état de surface des fibres. En effet, d'après Alfson, les fibres doivent être rugueux et arrondis aux extrémités afin de leur procurer une bonne adhérence à la matrice en béton.

En 1920, A.Kleinlogel a déposé le premier brevet allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usiné (par tournage) comme une masse d'acier. A cette période là, une étude sur les bétons avec des fibres de verre a été publiée par Griffith. Sept années après, en 1927 deux brevets sur les bétons de fibres ont été établis par W.Smith et G.Martin en Californie. Le procédé Martin recommande l'ajout des plaquettes d'acier emboutées ou de fils d'acier dans le béton qui sert à la fabrication des tuyaux. Alors que W.Smith recommande le malaxage des morceaux de fil tordus avec le béton en vue de construire un immeuble en béton armé. Quelques années après, en 1933 au New Jersey, H.Etheridge a inventé une technique pour améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution. Il a recommandé ensuite d'ajouter au béton des fibres en forme d'anneaux de différentes dimensions et de différents diamètres.

En 1938, un autre brevet britannique a été établi par N. Zitevic. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer avec approximativement 100 mm de longueur et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très similaires aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il conclut qu'il y'a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres dans le béton pour améliorer sa performance. en 1943, G. Constantinesco a recommandé Les paramètres qu'ils sont similaires à ceux d'aujourd'hui pour le béton de fibres. Il a recommandé également l'emploi de fibres permettant la résistance à la fissuration et à l'absorption de l'énergie par la masse de béton. Il a suggéré l'utilisation de cette composite dans plusieurs domaines spécialement dans la construction des pistes d'aéroport, fondations de machines et tous les ouvrages similaires.

Au début des années soixante, une série de brevets ont été établis par Battelle Développement Corporation. Ces brevets sont basés sur l'utilisation des morceaux d'acier pour le béton. Une

amélioration dans la résistance à la traction, l'absorption de l'énergie et la résistance à l'usure a été rapportée dans ces brevets. En 1963, deux articles ont été publiés par Romualdi et Batson dans lesquels une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Développement Corporation a été fondée avec des données expérimentales obtenues à l'essai de flexion. Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de Romualdi, Batson et Mandel. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier de fondateurs, on décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile. Ils ont aussi développé une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Développement Corporation et mettent notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres sur le comportement du composite.

D'autres chercheurs étaient aussi actifs pendant cette période et à partir de la fin des années soixante plusieurs chercheurs à travers le monde entier sont arrivés à pousser les travaux dans ce domaine vers l'application dans des secteurs de la construction où ce type de béton a été introduit avec beaucoup de fiabilité par rapport aux bétons traditionnels. Le plus grand progrès a commencé en 1970 avec l'incorporation des fibres d'acier dans le domaine de l'industrie réfractaire. Le premier article de ce concept a été publié par Lankard et Sheets dont lequel ils ont affirmé que l'ajout de 1 à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité.

4-4- Rôles de fibres dans le béton :

Les fibres ont pour rôle principal de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles pour ralentir et maîtriser la propagation de celles-ci. En effet, les fibres jouent le rôle de couture des microfissures et retardant l'apparition de macrofissures.

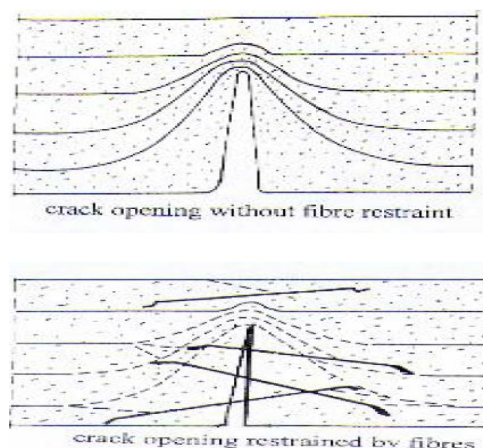


Figure 4.1. Rôle de fibres dans le béton

Selon la nature et la forme des fibres utilisées, le rôle des fibres se traduit aussi par d'autres améliorations :

- L'amélioration de la résistance à la traction et la flexion
- L'amélioration de la ductilité et la capacité d'absorption d'énergie
- L'amélioration de la résistance au feu, à l'usure et à l'abrasion
- La limitation de la fissuration due au retrait

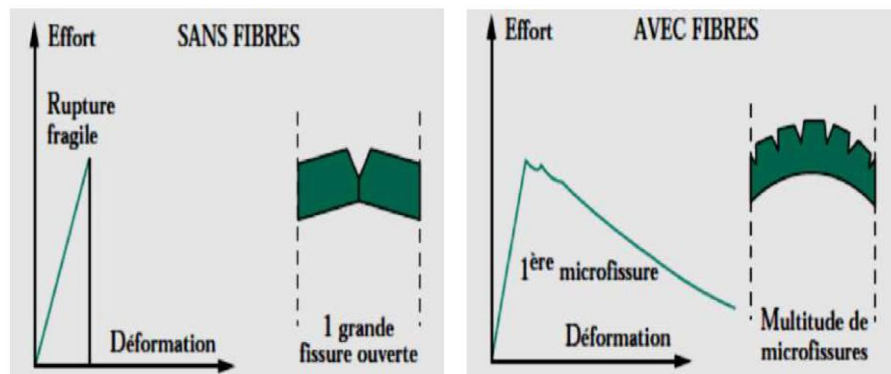


Figure 4.2. Rupture en flexion dans un béton ordinaire et un béton de fibres

4-5- Spécificités des fibres:

Les fibres utilisées dans la fabrication de béton de fibres doivent répondre aux exigences suivantes :

- être faciles à se répartir de manière homogène et se disperser dans le béton (pas d'agglomération de fibres)
- être flexibles et offrir une bonne capacité de déformation
- assurer un bon ancrage dans le béton et une bonne adhérence avec la pâte de ciment

4-6- Fibres utilisés dans le béton :

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme (flexibles, ondulées, avec crochets) et leur état de surface. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix. Les fibres utilisées dans le béton se déclinent en trois grandes familles qui sont :

- **Les fibres métalliques** (aciers, inox, alliages amorphes)
- **Les fibres organiques** (polypropylène, polyéthylène, nylon, acrylique, polyester...)
- **Les fibres minérales** (verre, carbone)

Les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres métalliques, polypropylènes et de verre.

4-6-1-Fibres métalliques :

Les fibres métalliques sont les plus utilisées dans le domaine du génie civil. Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur diamètre, leur longueur et leurs modes d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes, ondulées, ou présenter des élargissements aux extrémités en crochets pour améliorer l'accrochage, elles peuvent présenter des aspérités ou des crans de surfaces. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm.

Les fibres métalliques ont un module d'Young élevé. Elles ne sont donc pas efficaces vis-à-vis de la fissuration d'un béton au jeune âge. Par contre, lorsque le béton atteint des résistances importantes, les fibres métalliques apportent une réelle contribution.

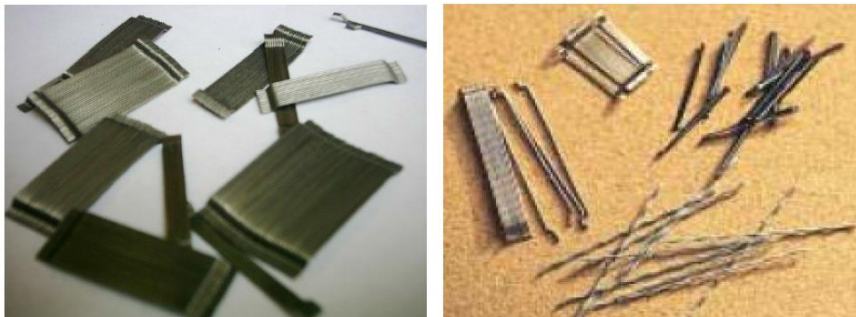


Figure 4.3. Fibres métalliques

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique d'un béton de structure (résistance au cisaillement, en traction, en flexion, au choc). Leur comportement s'apparente à celui des armatures dans le béton traditionnel. Elles confèrent au béton une certaine ductilité (résistance à la post-fissuration) et une plus grande résistance à la rupture et à la fatigue. Elles permettent de répartir de manière homogène la fissuration du béton avec des ouvertures de fissures très fines (les fissures des ouvrages réalisés en béton de fibres métalliques sont plus fines que celles des ouvrages réalisés en béton armé traditionnel) et donc une meilleure redistribution et dispersion des efforts. Elles augmentent donc la capacité

portante d'une structure soumise à des fissures de traction, mais elles n'ont pas d'effet sur la résistance en compression du béton.

La maîtrise de la fissuration du béton permet de limiter la pénétration des agents agressifs. Il en résulte une plus grande durabilité des structures. Les fibres métalliques sont très efficaces vis-à-vis des fissures de faibles ouvertures et donc pour des structures pour lesquelles la fissuration se traduit par un grand nombre de fissures de faibles ouvertures. Elles se substituent partiellement aux armatures traditionnelles et permettent de renforcer l'action des armatures traditionnelles.

Les fibres métalliques agissent sur le comportement en traction du béton. Le béton fibré avec des fibres métalliques se comporte avant rupture selon 2 phases successives :

- les fibres et le béton agissent ensemble dans une phase élastique ;
- des microfissures se produisent, l'effort de traction est repris par les fibres qui transmettent les contraintes au droit des fissures, ce qui limite la propagation de la fissuration. Toute fibre métallique qui traverse une fissure crée un « pont » entre les deux bords de la fissure. Ce pont va permettre le transfert de la contrainte ayant entraîné l'ouverture de la fissure. La fibre s'oppose ainsi à l'élargissement de la fissure, jouant le rôle de couture des microfissures et retardant l'apparition de macrofissures. Les fibres apportent ainsi des caractéristiques mécaniques post fissuration au béton.

Les performances mécaniques des bétons de fibres métalliques augmentent avec :

- la performance mécanique et la compacité de la matrice béton : plus la matrice est compacte, plus la fibre est ancrée ;
- le dosage en fibres ;
- les propriétés intrinsèques des fibres (géométrie, forme, longueur, diamètre, rapport longueur sur diamètre...), le type de fibres (résistance à la traction...) et le type d'ancrage ;
- l'orientation des fibres au sein du béton par rapport au sens de fissuration ;
- l'efficacité des fibres et leur capacité à dissiper de l'énergie par plastification : Plus le rapport longueur/diamètre est important, plus la surface spécifique est grande et donc plus la fibre est efficace (dissipation d'énergie par frottement) et les performances du béton fibré élevées.

Les bétons de fibres métalliques sont utilisés dans les dallages et les sols industriels, pour la fabrication de voussoirs de tunnels, la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement), ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.

4-6-2-Fibres polypropylènes :

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Elles se caractérisent par leur faible densité. Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement. L'utilisation de ces fibres a connu une extension croissante dans le domaine de génie civil où elles apportent les avantages d'une déformabilité élevée et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa. Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au retrait plastique ainsi que leur résistance aux chocs. Aussi, l'incorporation dans le béton des fibres polypropylène à des dosages de l'ordre de 1 à 3 kg/m³ permet d'améliorer la tenue au feu du béton en réduisant le risque d'écaillage. A l'état frais, Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton et limitent son ressuage. Bien ancrées dans une matrice peu compacte, elles sont donc très réactives vis-à-vis de la fissuration du béton au jeune âge (faibles ouvertures de fissures, faibles efforts à reprendre, matrice peu compacte et module des fibres supérieur à celui du béton). Par contre, Les fibres polypropylènes n'améliorent pas le comportement post-fissuration du béton (contrairement aux fibres métalliques) car leur module d'élasticité est trop faible par rapport à celui du béton durci.



Figure 4.4. Fibres polypropylènes

La fabrication du béton avec des fibres polypropylène ne soulève aucune difficulté. La répartition des fibres est facile et ne nécessite pas de précaution particulière lors du malaxage.

Les fibres se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton. De leurs propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres polypropylène :

- dallages et aménagements urbains ;
- produits préfabriqués (parements) ;
- bétons projetés et mortiers projetés.

4-6-3-Fibres de verre :

Les fibres de verre de type «E» sont les fibres de verre classique. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, mais sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. Leur emploi dans le béton nécessite donc l'incorporation de polymères au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline. Les fibres de verre de type «AR» (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis. Un traitement d'ensimage (dépôt d'un produit de protection) améliore encore leur tenue. Les fibres de verre se caractérisent par des propriétés mécaniques élevées (une résistance à la traction de l'ordre de 3000 MPa) et leur excellente résistance au feu (jusqu'à 800°C). Cette caractéristique et son coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confèrent aux bétons de fibres de verre une bonne résistance à des températures élevées.



Figure 4.5. Fibres de verre

Grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, les fibres de verre sont des renforts très efficaces du béton. Elles se dispersent facilement dans la matrice cimentaire, ce qui permet de réaliser des produits de formes très variées présentant des arêtes fines et des moulages précis. En s'opposant à la propagation des microfissures dans le béton, elles améliorent la résistance

à la traction du béton et sa ductilité. Elles ont une bonne résistance à la corrosion et aux attaques chimiques.

En préfabrication, les fibres de verre permettent de maîtriser en usine de préfabrication, les efforts lors de la manutention des éléments au jeune âge. les domaines d'application des fibres de verre sont très vastes, en particulier pour la réalisation d'éléments de faible épaisseur, esthétiques et légers :

- panneaux de façade minces ;
- bardages et éléments décoratifs et architectoniques ;
- éléments divers : coffrets, coffrages, habillages ;
- produits d'assainissement : tuyaux, caniveaux ;
- mobiliers urbains.

4-7- Orientation préférentielle des fibres :

Les bétons fibrés présentent 2 spécificités :

- Orientation préférentielle des fibres : le béton fibré est un fluide visqueux dans lequel les fibres sont en suspension. Elles s'orientent lors du bétonnage de manière préférentielle parallèlement au sens de l'écoulement du béton et aux parois. Cette tendance augmente lorsque le rapport distance d'écoulement sur longueur de la fibre augmente.
- Hétérogénéité de la distribution spatiale des fibres dans le béton durci qui génère une hétérogénéité des caractéristiques du béton fibré.

L'orientation préférentielle dépend de :

- la dimension, la forme et la géométrie de la structure au regard de celles des fibres
- la technologie de mise en place du béton (benne, pompe...)
- la distance que doit accomplir le béton dans le coffrage pour le remplir.

Les fibres conservent définitivement cette orientation préférentielle lors de la prise et du durcissement du béton. Si elles sont parallèles aux directions de propagation des fissures, elles n'ont aucun effet. A l'inverse, elles ont un effet maximum si elles sont perpendiculaires aux

fissures. Plus le pourcentage de fibres bien orientées par rapport à l'orientation potentielle des fissures est grand, plus le béton de fibres métalliques est mécaniquement efficace. Pour la formulation des bétons de fibres métalliques et le dimensionnement de la structure dans laquelle ils seront utilisés, il est nécessaire d'avoir une approche globale intégrant le choix du type de fibres en fonction de la structure et de la technique de mise en œuvre du béton adoptée afin d'intégrer le risque de dispersion.

4-8- Fabrication et mise en œuvre du béton renforcé de fibres (BRF) :

Les bétons fibrés peuvent être mis en œuvre par déversement à l'aide d'une benne, par pompage ou par projection sous forme de béton coulé en place, béton préfabriqué ou béton projeté. L'incorporation des fibres dans le béton doit être particulièrement soignée, elle peut se faire :

- au malaxage avec intégration manuelle dans le malaxeur ou à l'aide de systèmes automatiques de dosage et d'introduction des fibres ;
- au moment du coulage (dans la toupie sur le chantier) ;
- lors de la projection (béton projeté).

Des précautions doivent être prises lors du malaxage pour éviter la formation d'agglomérations de fibres. Une optimisation du mode d'introduction des fibres permet d'assurer une distribution uniforme des fibres dans le béton. Le temps de malaxage doit être adapté en fonction du type de fibres et de son dosage. Les bétons fibrés doivent être vibrés et faire l'objet d'une cure adaptée à la formulation et aux conditions météorologiques.

4-9- Propriétés des bétons de fibres :

Comparé au béton sans fibres, le béton renforcé de fibres a les propriétés suivantes :

- de meilleures résistances au choc, à l'usure, à l'abrasion et aux cycles de gel / dégel ;
- une résistance à la traction légèrement accrue ;
- un comportement ductile amélioré : le béton pourra donc se déformer sans se fissurer. Après apparition des fissures, les fibres reprennent les efforts de traction dans le béton et évitent la rupture soudaine de manière fragile. Elles confèrent ainsi au béton un comportement ductile.

- une résistance à la compression identique : l'évolution de la résistance à la compression des bétons fibrés est similaire à celle des bétons ordinaires : elle atteint 70 % de la résistance totale dès 7 jours. Cette résistance varie entre 20 et 40 MPa après 28 jours.
- une bonne résistance au feu : le béton fibré est un béton résistant à des températures élevées et au feu (à plus de 800°C)
- bonnes qualités d'isolation thermique même pour les parois les plus minces.

4-10- Domaines d'application des bétons de fibres :

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications :

- **béton coulé en place** : dallages industriels et commerciaux, aires de stockage, chaussées et parkings aéronautiques, quais portuaires, radiers, planchers-dalles, dalles de fondation, semelles filantes, planchers, chapes flottantes et dallages de maisons individuelles, revêtement de tunnels et de galeries, parois moulées, pieux forés...
- **béton préfabriqué** : voussoirs préfabriqués, panneaux de façade minces, tuyaux, regards, cuves, réservoirs, fosses septiques, panneaux de clôture...
- **béton projeté** : soutènements provisoires ou définitifs d'ouvrages souterrains (galeries, cavités souterraines et tunnels), confortement de parois, réparation et renforcement d'ouvrages, revêtement de tunnels, parois clouées, stabilisation de talus et d'excavation...
- **mortier** de réparation, de scellement et de renforcement des ouvrages.

4-11- Conclusion :

Les bétons fibrés sont des bétons améliorés par l'ajout de fibres et faciles à mettre en œuvre. Les bétons de fibres présentent des caractéristiques et des propriétés différentes en fonction des fibres qui entrent dans leurs compositions : Le béton fibré est parvenu à séduire de nombreux utilisateurs car il s'avère être plus ductile et présente moins de microfissures en surface que le béton armé.

Chapitre 05 : Bétons à poudres réactives (BPR)

5.1. Introduction :

Le béton à poudres réactives (BPR) est inventé en 1990 par le chercheur Pierre Richard. Le béton à poudres réactives qui est considéré comme l'ancêtre des bétons de fibres à ultra hautes performances est formé à partir de poudres, il possède une teneur élevée en fumée de silice. Ce type de béton a des propriétés physiques étonnantes : une très bonne résistance à la compression (au moins 400 MPa) et une résistance traction/flexion suffisante pour pouvoir s'affranchir des armatures classiques (au moins 40 MPa) et une ductilité très élevée.

5.2. Historique sur les bétons à ultra hautes performances (BUHP) :

Les BUHP sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques (BFUP) en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet.

Les premiers matériaux cimentaires à ultra hautes performances sont apparus dans les années 1970 sous forme de pâtes de ciment "Compacts" à 640 MPa, de rapport E/C = 0.21 avec cure thermique à 250 °C et pressage à 345 MPa. Ensuite, développés au Danemark dans les années 1980 sous le nom "Densified Small Particles" à 270 MPa, avec un rapport E/C de 0.18, suivi du "Compact Cement Composite" en 1987 qui conduisit à la technologie CRC ("Compact Reinforced Concrete").

En France, les premières recherches et les premiers développements ont été effectués par la direction Scientifique de la Société Bouygues qui développa un béton de poudres réactives (BPR). L'absence de gros granulats dans les BUHP permet de réaliser des éléments de parement très fins d'une épaisseur de 15 mm. Bon nombre de ces réalisations exemplaires ont notamment vu le jour en France, en Allemagne ou en Asie.

La première application en béton fibré ultra hautes performances (BFUP) fut la réalisation de la passerelle piétonne à Sherbrooke (Québec, Canada) en 1997. En 1998, la première application en France fut la réalisation des poutrelles de renforcement d'un aéro-réfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom. D'autres ouvrages en BFUP ont aussi vu le jour après la publication de la recommandation provisoire de l'AFGC en 2002, tels que la passerelle piétonne Sakata-Mirai au Japon en 2002, passerelle de la Paix à Séoul en 2004, poutres de renforcement d'un aéro-réfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom, la passerelle des

Angles du pont du Diable à Saint Jean de Fos (Hérault) en 2007, le musée MUCEM à Marseille en 2013, et le stade Jean Bouin à Paris en 2014.

5.3. Définition :

Les BPR sont des micros bétons dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. Les BPR contiennent un sable très fins ($D_{max} < 600 \mu m$), de forts dosages en ciment et fumée de silice, du quartz broyé, une teneur en eau très faible et un superplastifiant. Pour augmenter encore leurs performances, certains BPR subissent un traitement thermique : au-dessus de $90^{\circ}C$, le quartz broyé réagit alors par réaction pouzzolanique ; au-dessus de $200^{\circ}C$, l'espacement des feuilletts de C-S-H (porosité nanométrique) diminue et on observe une augmentation de la cristallinité de ces hydrates. On peut encore presser les BPR traités thermiquement avant et pendant la prise pour augmenter leur compacité.

5.4. Composants du béton à poudres réactives :

5.4.1. Ciment :

Le ciment constitue le liant hydraulique qui peut produire un solide possédant les propriétés de cohésion et de résistance nécessaires à son usage. Les formulations de BPR se caractérisent par l'emploi d'une grande quantité de ciment (de 700 kg/m^3 jusqu'à plus de 1000 kg/m^3). Cette quantité considérable de ciment, à laquelle vient s'ajouter aussi des ultrafines, a pour but de diminuer au maximum les vides, et d'augmenter, par conséquent, la compacité du mélange.

Comme pour les autres types de bétons, Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts CPA (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts. Aussi, l'utilisation de ciment à faible teneur en C_3A et à faible surface spécifique permet d'augmenter l'ouvrabilité des BPR. D'autres types de ciment tels que le CEM II 42,5 et les CEM III ont été utilisés dans la confection de BFUP selon les résistances mécaniques visées.

5.4.2. Granulats :

Le sable constitue le plus gros granulats du BPR, sa taille moyenne est inférieure à $600 \mu m$. Un meilleur choix de ce composant garantirait une bonne interface pâte granulats. Ceci faciliterait

le contrôle de la rhéologie et améliorerait les performances mécaniques du matériau. En effet, l'utilisation des grains de forme arrondie, présentant une faible adsorption d'eau, favorise la rhéologie du béton. Dans la formulation des BPR, le sable utilisé doit être un matériau de grande dureté qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâtes/granulats. La taille moyenne de ses grains doit être comprise entre 400 et 600 μm avec une forme arrondie pour favoriser la rhéologie du BPR.

5.4.3. Additions :

Grace à l'effet physique et chimique, la fumée de silice, le quartz broyé, et plus récemment, le métakaolin se présentent comme les additions les plus utilisées dans la formulation des BPR. Les additions ont les fonctions essentielles suivantes dans la matrice cimentaire du BPR:

- effet filler : elles comblent les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable pour constituer un mélange qui possède une très grande compacité et par conséquent elles améliorent la rhéologie de ce mélange.
- effet chimique : elles forment des nouveaux produits d'hydratation (C-S-H) par leur réaction pouzzolanique avec la chaux libérée lors de la réaction d'hydratation du ciment.

5.4.3.1. Fumée de silice :

La fumée de silice riche en (SiO_2) est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Les particules de fumée de silice sont lisses et sphériques (100000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair. Le dosage en fumée de silice utilisé en substitution partielle de ciment dans la fabrication des BPR est de 10 à 30% par rapport à la masse de ciment. La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise la formation des silicates de calcium hydratés (C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte.

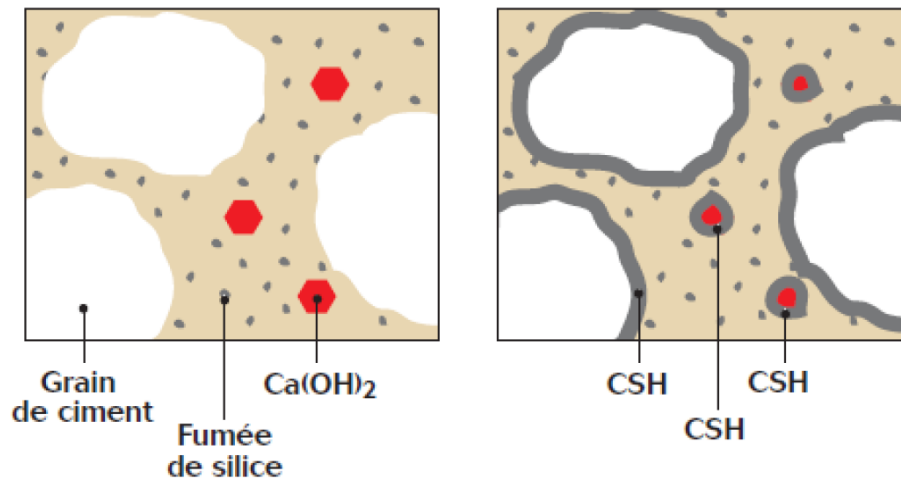


Figure &&é : Principe de la réaction pouzzolanique

En plus, La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment. Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton

L'utilisation de la fumée de silice qui se caractérise par sa haute réactivité conduit à :

- Offre au BPR un comportement visqueux et compacte au repos et devient fluide dès que l'on applique une pression
- accroissement de la résistance mécanique du BPR
- affinement de la structure poreuse de l'empilement granulaire du BPR
- diminution de coefficients de diffusion et de la perméabilité du BPR qui conduit à l'amélioration du BPR aux agents agressifs comme les acides et les sulfates.
- diminution du PH et des concentrations en alcalins dans la solution interstitielle

En revanche, l'introduction de la fumée de silice dans la composition du BPR conduit à :

- Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice
- Accroissement de la demande en eau
- Accroissement du retrait endogène

5.4.3.2. Quartz broyé :

Le quartz broyé est une poudre de diamètre moyen compris entre 10 et 15 μm , issue du broyage d'un sable très riche en silice ($\text{SiO}_2 > 98 \%$) généralement utilisé dans la fabrication du verre. Le quartz broyé est indispensable lors des traitements thermiques d'un BPR. La réactivité optimale est obtenue avec une taille maximale des grains comprise entre 5 et 25 μm . La quantité utilisée en substitution correspond à un rapport silice/ciment optimal de 0,62. L'ajout de quartz broyé dans les BPR traité thermiquement ne conduit pas à une augmentation significative des résistances à la flexion (+2,6%), mais favorise remarquablement les résistances en compression (+8,2%), grâce à l'apparition de nouvelles phases hydratées sous haute température.

5.4.4. Superplastifiant :

Grace à son effet dispersant, l'utilisation d'un superplastifiant est indispensable dans la formulation d'un BPR pour fluidifier le mélange tout en gardant un rapport Eau/Liant faible. Le dosage optimal en superplastifiant dans le cas des BPR est situé généralement entre 1 et 3% du poids de ciment.

5.4.5. Fibres :

Les fibres sont destinées à renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles, en s'opposant à la propagation des microfissures. Les fibres utilisées dans le béton augmente la ductilité, réduire la microfissuration et améliore la résistance du béton à la traction et à la flexion. Le choix de type de fibres utilisées dans le BPR est conditionné par le type d'application. Pour les BPR structuraux, l'utilisation des fibres métalliques est recommandée, tandis que l'emploi de fibres synthétiques est préconisé dans le cas de BPR non structuraux. Concernant le dosage volumique en fibres pour les BPR, il peut varier de 2 à 11%, ce qui correspond à environ 160 à 856 kg/m^3 . La teneur volumique minimale en fibres garantissant la non-fragilité du matériau doit être équivalente ou supérieure à 2%.

5.5. Formulation des BPR :

5.5.1. Principes de formulation :

La formulation du BPR est orientée par les principes suivants :

- amélioration de l'homogénéité macroscopique du béton par réduction du diamètre du plus gros granulat.
- amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire.
- réduction du rapport eau/liant.
- amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- choix de constituants de très grandes qualités (dureté du sable, indice d'activité de la fumée de silice, classe vraie du ciment, pouvoir défloculant du superplastifiant).
- optimisation de la compacité du squelette granulaire en augmentant l'étendue granulaire du squelette par adjonction d'ultrafines pouzzolaniques dont la dimension des particules est inférieure à celles des ciments. Selon le volume et la nature des fibres utilisées, la masse volumique des BPR varie entre 2300 et 3000 kg/m³, la teneur en air est inférieure à 4% (généralement 2%).

5.5.2. Effet du rapport Eau/Liant :

Pour ce qui concerne la teneur en eau, les BPR sont obtenus en choisissant un faible rapport Eau/Liant, inférieur à 0.20, dans le but de réduire au maximum la porosité du matériau et la connectivité des pores résiduels. Pour atteindre des résistances de l'ordre de 150 MPa, il est nécessaire de réduire le rapport Eau/Liant à des valeurs inférieures à 0,2. Pour de telles valeurs, la quantité d'eau n'est pas suffisante pour hydrater la totalité du ciment, ce qui implique qu'une part importante du ciment demeure non hydratée et joue le rôle d'un filler, mais demeure suffisante pour procurer une cohésion et structurer le matériau. Les grains de ciment anhydre sont plus résistants que les principaux hydrates du ciment. Ainsi, ils peuvent contribuer à l'augmentation des performances mécaniques et confèrent au matériau une capacité d'auto-cicatrisation en présence d'eau. Le tableau 5.1 montre les dosages des constituants d'un BPR

Tableau 5.1 Formulation d'un BPR

Formulation d'un BPR						
Ciment	Sable	Quartz broyé	Fumée de silice	Fibres métallique	Superplastifiant	Eau total
710 kg	1020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg	140 L

Cette formulation peut être déclinée, en faisant varier :

- le type des constituants ;
- la proportion relative des constituants ;
- le taux de fibres (0 % pour le matériau non fibré, 2 à 2,5 % en volume pour le matériau fibré) ;
- le rapport E/C (eau/ciment).

5.6. Propriétés des BPR :

5.6.1. Rhéologie :

Sur le plan de la fluidité, un BPR se comporte généralement comme un béton hyper-fluide et présente un caractère autoplaçant et thixotropique assurant une bonne ouvrabilité. Ce comportement est due a l'abandon de l'utilisation de gros granulats, l'utilisation de fort dosage en fines et ultrafines en combinaison avec les adjuvants haut réducteurs d'eau. Le caractère thixotropique est lié au volume de pâte important et au faible rapport E/C.

5.6.2. Résistance à la compression :

La résistance caractéristique en compression à 28 jours d'un BPR est généralement supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa. L'optimisation du squelette granulaire permet de diminuer le volume des vides et par conséquent d'augmenter la résistance en compression. Le traitement thermique permet de modifier la structure des hydrates pour les rendre encore plus performants. L'ajout de fibres peut améliorer la résistance en compression si le dosage volumique est supérieur à 2%. La figure 5.1 montre l'évolution de la résistance à la compression à 5 heures, 8 heures, 7 jours et 28 jours pour des BPR traités thermiquement à 50 °C juste après le coulage. Après le démoulage, ils ont été conservés dans l'eau à 20 °C jusqu'à l'échéance de mesure. On voit que les BPR traités thermiquement ont des valeurs de résistance à 5 et 8 heures supérieures à celles du BPR non traité thermiquement.

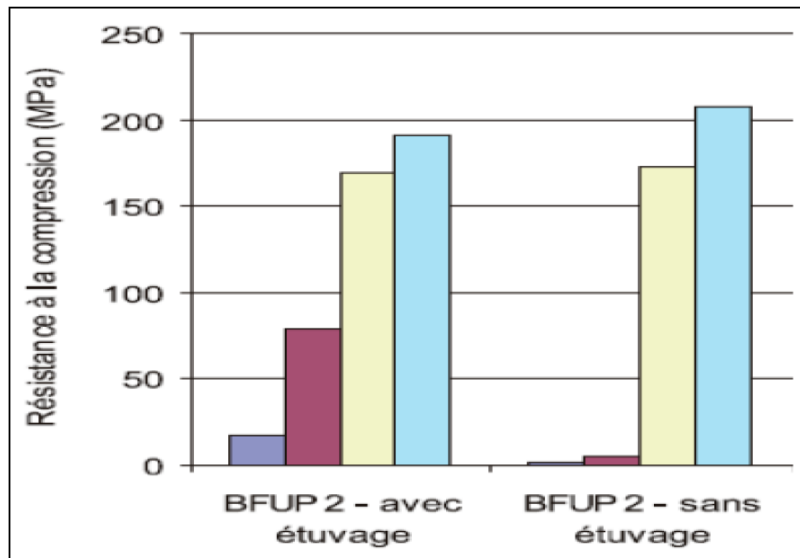


Figure 5.1 : Evolution de la résistance à la compression pour des BPR traités thermiquement

Les principaux facteurs influençant sur la résistance à la compression sont :

- **Le rapport E/C**

La réduction du rapport E/C est un des principes de formulation des BPR pour atteindre des résistances mécaniques élevées. Les valeurs de résistances en compression augmentent généralement lorsque le rapport E/C diminue. A un rapport E/C égal à 0,27, les valeurs de résistance varient de 130 MPa à 192 MPa. Généralement, ce rapport est autour de 0,2 pour les BPR.

- **La teneur en fibres**

Globalement, la teneur en fibres influence peu sur la résistance en compression, sauf quand celle-ci dépasse un dosage volumique de 2%. Des études antérieures ont montré une amélioration de 9% de la résistance en compression lorsque le taux d'incorporation de fibres passe de 1 à 4% volumique. Les fibres métalliques peuvent être incorporées dans la matrice cimentaire en quantité importante jusqu'à 10% volumique sans provoquer une amélioration substantielle de la résistance à la compression. Il faut noter qu'il est possible d'obtenir une résistance en compression de 180 MPa sans utiliser des fibres en améliorant la compacité du mélange.

- **Le Traitement thermique**

Les différents types de cure à appliquer au BPR sont utilisées soit pour assurer les performances recherchées à 28 jours dans le cas d'une cure humide à 20°C ; soit pour

accélérer les évolutions des résistances ; soit pour accélérer les réactions d'hydratation mais surtout pour former de nouveaux hydrates qui permettent d'accroître davantage la résistance mécanique.

La tendance à l'augmentation de la résistance en compression des BPR avec un traitement thermique est généralement de l'ordre de 12 à 40%. En revanche, des résistances en compression quasiment équivalentes entre la cure à 20°C et celle à 90°C des BPR où le quartz broyé n'était pas utilisé. Ceci montre que l'efficacité du traitement thermique varie en fonction de la composition du BPR, en particulier l'utilisation ou non du quartz broyé. Le traitement thermique à une température modérée, entre 30°C et 50°C, ne modifie pas la microstructure, mais permet d'accélérer la prise. Ce type de traitement thermique peut être un bon compromis pour garantir les résistances au jeune âge des pièces préfabriquées. En ce qui concerne la cure à 20°C, la résistance en compression obtenue varie entre 113 MPa et 255 MPa. La recherche des résistances mécaniques élevées sans utilisation de traitement thermique pour limiter la consommation énergétique et le coût a conduit à la formulation des BPR qui ont des valeurs de résistance en compression de plus de 200 MPa. Cette recherche se concentre sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire du mélange.

5.6.3. Résistance à la traction :

Une caractéristique remarquable des BPR est leur résistance à la traction dont la valeur minimale de 6 MPa est largement supérieure à celle des bétons ordinaires qui est de l'ordre de 3 MPa. Cette propriété est acquise grâce à l'optimisation de la compacité de la matrice et à l'ajout de fibres. L'incorporation de fibres dans la matrice cimentaire permet également d'améliorer fortement le comportement post-fissuration. Pour améliorer la résistance à la traction, les fibres utilisées sont le plus souvent métalliques. Le dosage et les dimensions de fibres sont optimisés vis-à-vis du comportement en traction recherché et des conditions de mise en œuvre, avec ou sans vibration. Il est également possible de combiner des fibres de dimensions variables afin d'améliorer la résistance à la traction et la ductilité. En effet, les microfibrilles (fibres courtes) retardent le développement des microfissures tandis que les macrofibres (fibres longues) peuvent conférer au matériau une grande ductilité

5.6.4. Résistance à la flexion :

Dans le cas des BPR non fibrés, la résistance aux efforts de flexion ne dépasse pas les 20 MPa et présente une rupture fragile. De ce fait, leur comportement mécanique est linéaire élastique jusqu'à la rupture. L'addition de fibres entraîne une augmentation significative des résistances

et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré, pour les BPR fibrés sans pressage avec une résistance à la flexion de l'ordre de 60 MPa.

5.6.5. Durabilité :

5.6.5.1. Porosité :

La porosité du BPR a été estimée à 6-7% pour des rapports eau/liant variant de 0.12 à 0.24. Il a été démontré aussi que la porosité du BPR peut être diminuée en introduisant des fibres dans la composition des BPR. Pour un BPR fibré dont le rapport eau/liant égal à 0.15, la porosité était estimée à 4.2%.

5.6.5.2. Absorption capillaire :

La figure 5.2 montre les valeurs de l'absorption capillaire d'un BPR200 en comparaison avec d'autres bétons. Pour les BPR, aucun fléchissement n'a été observé après 15 jours et l'absorption capillaire reste inférieure à 0.2 kg/m^2 . L'absence de point de fléchissement et la faible absorption caractérisent un béton ayant une absorption capillaire négligeable.

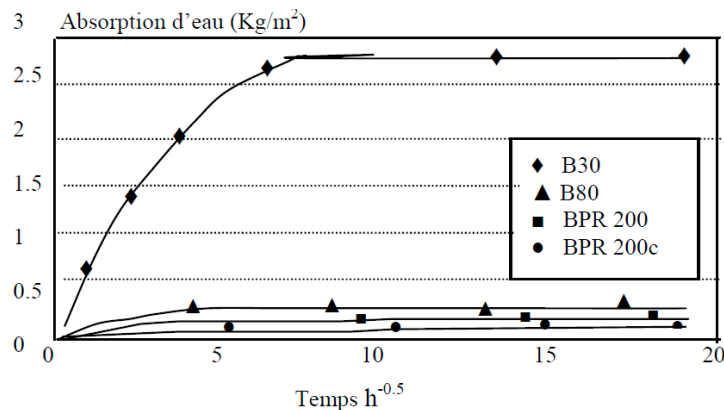


Figure 5.2 Absorption capillaire des BPR

5.6.5.3. Carbonatation et diffusion des ions chlorure :

L'accès des ions chlorures dans le béton via la porosité de celui-ci jusqu'à atteindre des armatures pourrait causer leur corrosion et nuire ainsi à la stabilité de la structure en milieu marin. Compte tenu à la faible porosité, le BPR présente une meilleure résistance aux ions chlorure. Le coefficient de diffusion des ions chlorure pour des BPR traité thermiquement et ayant un rapport eau/liant égale à 0.25 était estimé ente 0.1×10^{-12} et $0.18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

La faible porosité, la discontinuité des pores et la diminution du PH au sein du BPR ralentissent significativement la dégradation de ce matériau par carbonatation. Il a été estimé que le coefficient de carbonatation d'un BPR est dix fois inférieur à celui d'un béton à hautes performances. Pour un béton B30, le coefficient de carbonatation atteint 50mm/ an alors qu'aucune carbonatation n'a pu être détectée pour un BPR200.

5.6.5.4. Résistance au gel-dégel :

Des essais de gel/dégel réalisés sur des BPR. Le facteur de durabilité qui représente le rapport entre relatif au module d'élasticité initial en effectuant 300 cycles rapides de gel/dégel sur trois séries d'éprouvettes (75*75*350) cm en BPR. Les résultats sont montrés dans le tableau 5.2

Tableau 5.2 : Facteur de durabilité des BPR soumis au gel/dégel

Mélanges	Cure	Facteur de durabilité
A	20°C	100
	90°C	100
B	20°C	100
	90°C	101
C	20°C	102
	90°C	102

Les résultats obtenus montrent que les trois bétons ont une très bonne résistance au phénomène de gel/dégel et le facteur de durabilité est égal à 100 voire même supérieur.

5.6.6. Résistance à l'abrasion :

Due à ces performances mécaniques élevées, les BPR sont moins sensible à l'usure par abrasion que les bétons ordinaires. La résistance à l'abrasion augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression (Tableau 5.3).

Tableau 5.3 : Résistance à l'abrasion du BPR200

Mélange	B30	B80	BPR200
Coefficient d'abrasion	4.00	2.80	1.30

5.6.7. Résistance au feu:

Le BPR ne présente pas une aussi bonne résistance au feu que les bétons traditionnels. Sans traitement particulier, il présente une tenue au feu d'environ 15 min. Une formulation particulière en utilisant les fibres peut porter cette valeur à 60 min pour une structure non chargée et à 30 min pour une structure chargée.

5.6.8. Retrait :

Comme pour beaucoup d'autres bétons à très hautes performances, la teneur élevée en poudre du BUHP, son facteur E/C très faible et l'absence de gros granulats peuvent en effet générer des valeurs de retrait total considérables. Par ailleurs, comme pour les autres types de béton à très hautes performances, l'équilibre entre le retrait de séchage et le retrait endogène n'est pas constant.

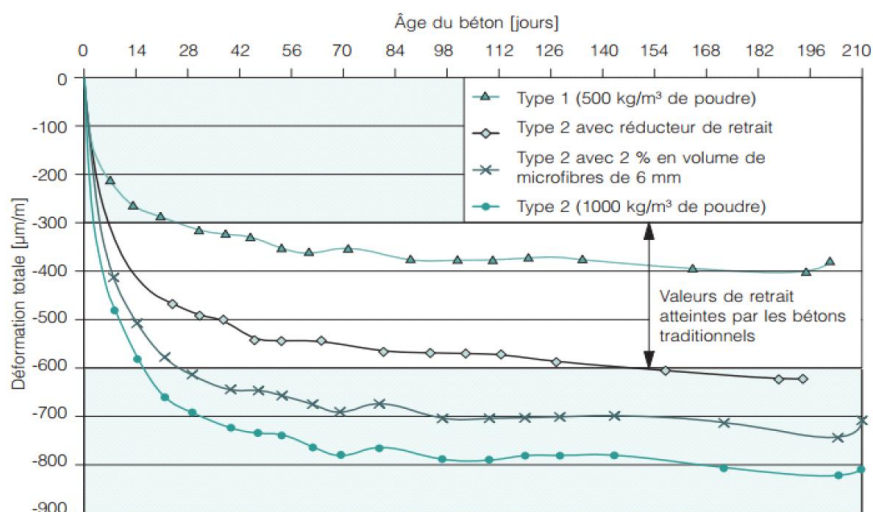


Figure 5. 3 Retrait des BPR

Quoique ces valeurs de retrait soient bien plus élevées que pour les bétons traditionnels, celles-ci sont plus faibles que prévu, pour des volumes de poudre aussi élevés. Après six mois, le mélange de référence de type 2 affichait ainsi un retrait de 800 µm/m, alors que les

bétons traditionnels ont enregistré des valeurs oscillant entre 300 et 600 $\mu\text{m}/\text{m}$. Pour le mélange de type 1 ($D_{\text{max}}8$ mm et 500 kg/m^3 de poudre), les valeurs de retrait enregistrées étaient encore plus basses que pour le type 2.

5.6.9 Microstructure du BPR :

Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BPR possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto cicatrisation en cas de fissuration. L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité pour ce matériau. Il est également d'usage de faire subir aux BPR un traitement thermique visant à améliorer la microstructure en activant la réaction pouzzolanique. En effet ce traitement permettrait de reconstituer des chaînes C-S-H plus longues. Ceci est attribué à l'hydratation rapide et à l'accélération de réaction pouzzolanique du quartz broyé.

5.6.9.1. Analyse thermogravimétrique

La figure 5.3 montre l'analyse thermogravimétrique d'un BPR. Il est montré qu'il existe trois pics :

- Le premier pic vers 120°C , qui correspond au départ d'eau libre est l'eau faiblement liée.
- Le deuxième pic entre 420°C et 500°C , correspond à la déshydratation de la chaux selon la réaction : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \longrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
- Le troisième pic entre 750°C et 800°C , correspond à la décarbonatation de la calcite CaCO_3 , selon la réaction $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

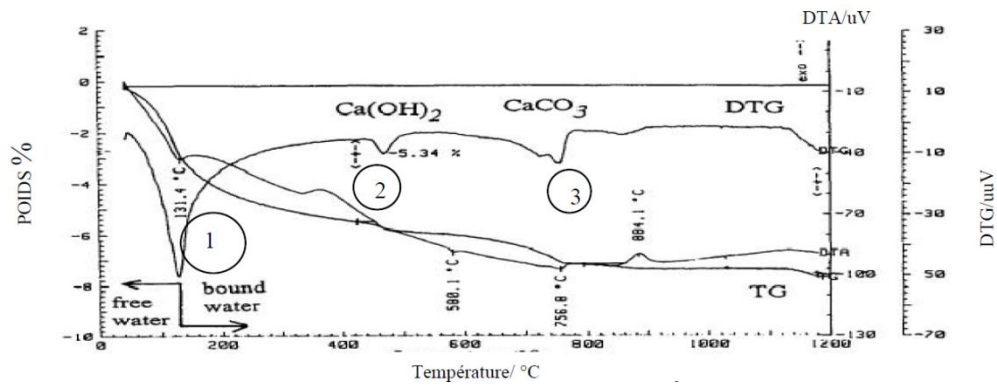


Figure 5.4 : analyse thermogravimétrique du BPR

5.6.9.2. Pourcentage d'eau liée

La figure 5.4 montre l'évaluation d'eau liée en fonction de la température de traitement d'un BPR. L'augmentation de la température permet d'augmenter le pourcentage d'eau liée présente dans le béton.

- A 400°C, toute la quantité d'eau présente dans le béton se trouve sous forme liée, ce qui permet d'éviter la migration d'agents agressifs dans le béton du fait de l'absence d'eau libre. Cela rend le béton plus durable.
- L'application d'une compression avant ou pendant la prise a peu d'influence sur la répartition de l'eau totale entre eau liée et eau libre.

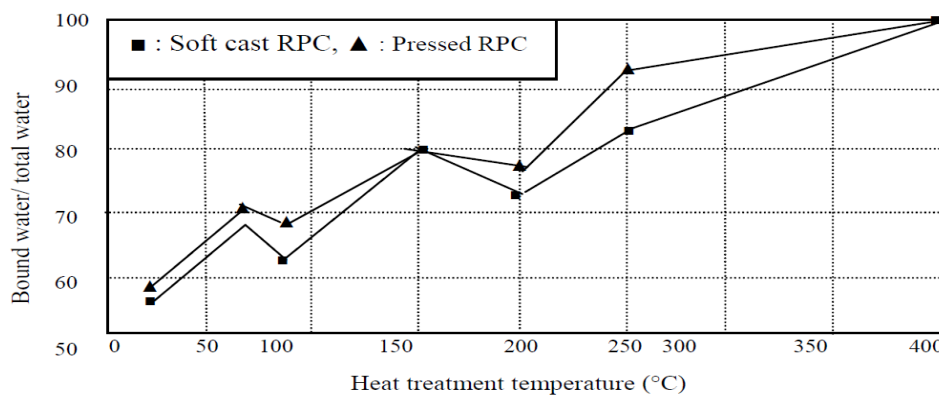


Figure 5.5 : Pourcentage d'eau liée dans le BPR

5.6.9.3. Taux de pouzzolanité

Le taux de pouzzolanité est la quantité donnée par la formule suivante :

$$Tpz = 1 - (MC - MC0) \text{ ou }'$$

Tpz : taux de pouzzolanité

MC : Masse de chaux présente dans l'échantillon

MC0 : Masse de chaux produite par l'hydratation primaire

La figure 5.5 montre les valeurs de taux de pouzzolanité dans des BPR pressés et non pressés. Le taux de pouzzolanité est mesuré sur des échantillons traités thermiquement et conservés à 20°C jusqu'à 28 jours.

- A 250°C, la quasi-totalité de chaux produite par la réaction d'hydratation est consommé par la réaction pouzzolanique. L'évolution de tau de pouzzolanité est similaire pour les échantillons comprimé et non comprimé.

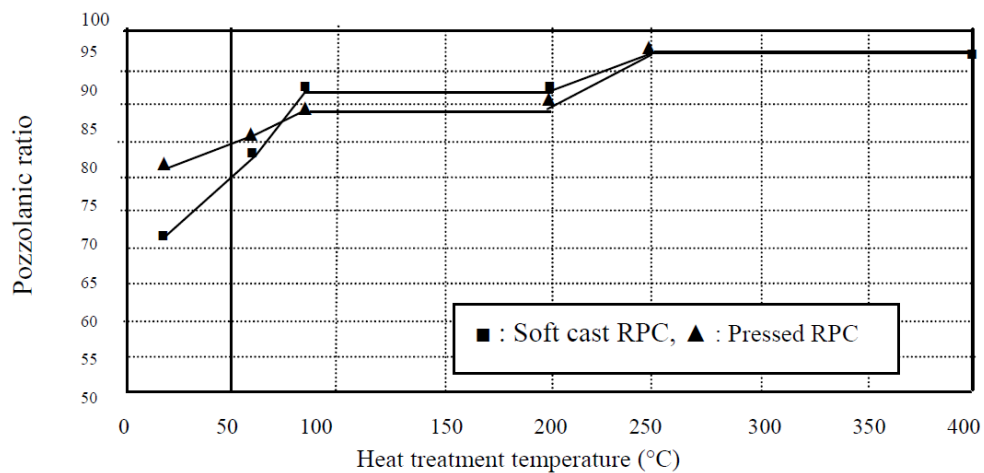


Figure 5.6 : taux de pouzzolanité dans le BPR

5.6.9.3. Présence de Xonolite :

La figure 5.6 montre la présence d'un pic supplémentaire à 800°C lors de l'analyse thermogravimétrie. Ce pic correspond à la perte d'eau par un hydrate cristallin 'Xonolite'. Cet élément n'est pas identifiable par thermogravimétrie que sur un échantillon prélevé au cœur de l'éprouvette. Du fait de la porosité extrêmement fine du BPR, l'eau extraite au cœur de l'échantillon assurant des conditions hydrothermales nécessaires à la formation de Xonolites.

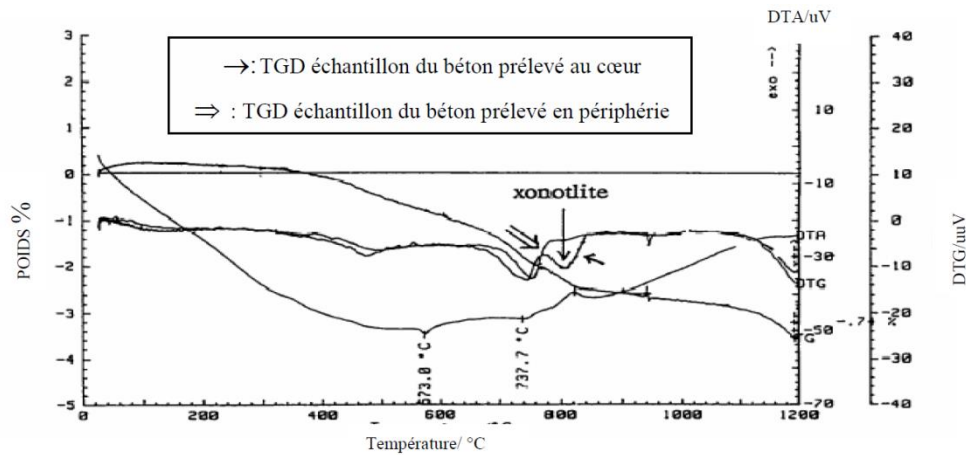


Figure 5.7 : Formation de Xonolites dans le BPR

5.6.9.4. Eau extraite :

La figure 5.7 montre une extraction d'eau importante se produit entre 230°C et 250°C. Cela est dû au fait qu'une perte d'eau initiale lors de la formation de Xonolites à partir des C-S-H.

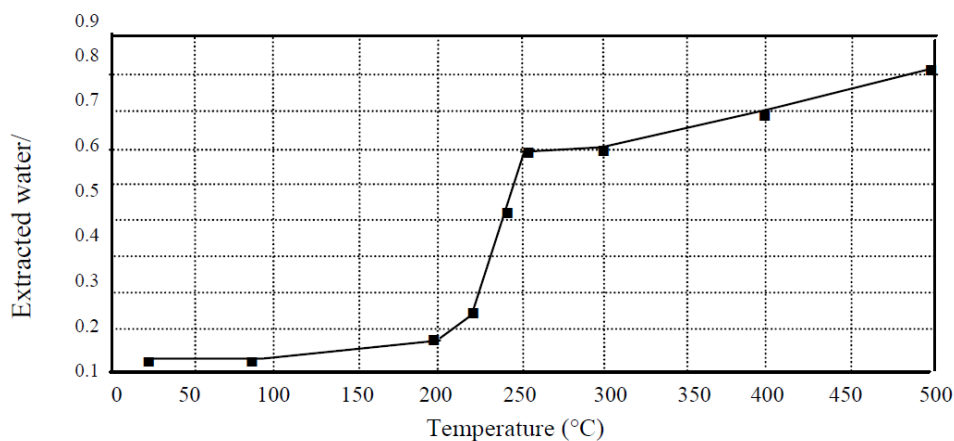


Figure 5.8 : Extraction d'eau dans le BPR traité thermiquement.

5.7. Avantage des BPR :

Le BPR répond plus particulièrement aux exigences suivantes :

- Bonne résistance contre les différents types de sollicitations appliquées
- Durabilité et durée de vie allongée avec un coût d'entretien réduit
- Meilleure performance aux chocs et à l'abrasion
- Décoffrage rapide et temps d'arrêt de la circulation minimal

- Bonne résistance au phénomène gel - dégel
- Comportement sismique amélioré grâce à ses propriétés de ductilité
- Finitions personnalisées, aspect élancé et qualité des parois améliorée

5.8. Inconvénients des BPR :

- Cout de fabrication plus élevé due à l'utilisation en grande quantité de ciment, fumée de silice, adjuvants et fibres.
- Complexité et sensibilité de leur formulation à cause de l'utilisation de plusieurs composants de nature différente

5.9. Domaines d'application des BPR :

Les caractéristiques du BPR en font un matériau unique avec des possibilités d'utilisation dans une large gamme d'applications structurelles et non structurelles en raison de sa résistance supérieure et de son excellente durabilité. Ses applications dépassent alors le simple cadre du bâtiment et du génie civil.

- leur emploi s'avère intéressant pour la réalisation des colonnes, en ce sens qu'il permet de construire des éléments plus élancés, voire de réduire le nombre de colonnes
- les BPR offrent une plus-value en particulier dans les cas exigeant une résistance élevée en compression : rideaux de palplanches, tuyaux de refoulement, éléments de pont, les BPR ont aussi une résistance accrue au poinçonnement, ce qui offre des perspectives en ce qui concerne les systèmes de plancher
- l'utilisation de panneaux rectangulaires minces (quelques centimètres d'épaisseur) en BPR constitue également une solution intéressante pour les revêtements muraux. Les éléments de parois existants pourraient ainsi être rendus plus minces (et plus légers) et concurrencer des matériaux tels que la céramique, la pierre naturelle, ... Le recours aux armatures textiles (treillis continu ou fibres dispersées) permettrait en outre de réduire encore davantage les épaisseurs d'enrobage •
- le BPR peut également s'utiliser comme finition de surface ainsi que pour la réparation d'ouvrages en béton. Le BPR est particulièrement résistant à l'usure et aux attaques chimiques

- enfin, l'application des BPR en tant que coffrages perdus permet de combiner les exigences constructives et une finition architectonique durable

5.10. Conclusion :

Les BPR sont des matériaux cimentaires de hautes performances grâce à l'emploi d'adjuvants qui réduisent la quantité d'eau, et d'ultra fines comme la fumée de silice qui améliorent la compacité, faciles à mouler et bien adaptés à la préfabrication. Le traitement thermique peut être appliqué à ces bétons pour améliorer leurs résistances mécaniques. De plus, l'ajout des fibres dans leur fabrication les rend très ductiles et très résistants à la traction. Après durcissement, les BPR présentent une résistance caractéristique à la compression généralement supérieure à 150 MPa et pouvant aller jusqu'à 250 MPa.

Chapitre 06 : Les Bétons polymères (BP)

6.1 Introduction

Les qualités mécaniques et le coût relativement peu élevé du béton de ciment Portland en font le matériau de construction le plus utilisé. Cependant, celui-ci présente certains handicaps tels qu'une faible résistance à la traction et à la flexion, une faible déformation à la rupture, la sensibilité au gel, un faible force de liaison dans les applications de réparation, et une mauvaise résistance aux agents agressifs. Pour pallier à certains de ces défauts et pour répondre aux nouveaux besoins qui cherchent des matériaux multifonctionnels possédant un rendement élevé, les chercheurs ont trouvé des matériaux composites, intégrant des polymères à la place ou en combinaison avec le ciment Portland, ce sont les bétons polymères.

6.2 Définition

Le béton polymère (BP) ou béton de résine est un matériau fabriqué en remplaçant totalement ou partiellement le ciment portland par un polymère. Semblables aux matériaux de ciment classiques, les matériaux composites aux polymères comprennent trois phases: une phase dispersée, constituée par des agrégats et des renforts (si elle est appliquée); une phase continue formée par la matrice de liant (ciment et/ou polymère), et une certaine porosité imposée, soit par la granulométrie du granulat ou par le procédé lui-même. En fonction de la nature chimique des composants, leur contenu et leur procédé de fabrication, les BP se divise en trois classes :

- Béton imprégné par polymère (BIP);
- Béton polymère (BP);
- Béton modifié par polymère (BMP).



Figure 6.1. Béton polymère

6. 3. Constituants de béton de polymère :

Le béton de résine (polymère) est formé par un squelette granulaire (granulats) et un liant polymère (résine) parfois thermoplastique mais dans la plupart des cas thermodurcissable

6.3.1. Polymères :

Les polymères sont des structures ayant une architecture le plus souvent linéaire ou tridimensionnelle constituée par l'enchaînement covalent de plusieurs unités chimiques de répétitions ou motifs unitaires appelées 'monomères' possédant une ou plusieurs fonctions chimiques potentiellement réactives. Le nombre et la nature de ces fonctions permet de déterminer ce que l'on appelle la fonctionnalité du monomère, c'est-à-dire le nombre de liaisons qu'un monomère peut établir avec d'autres monomères lors de la réaction chimique appelée 'polymérisation'. La différence entre un polymère et une grosse molécule quelconque provient de cette répétition de molécules identiques ou similaires constituant une chaîne ou une portion de chaîne. Les polymères peuvent être fabriqués à partir d'un seul type de monomère (on parle alors d'homo polymère, comme par exemple le polystyrène), ou bien à partir de plusieurs types.

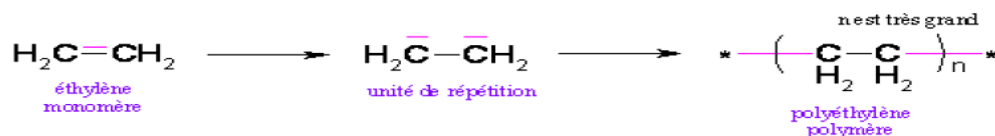


Figure 6.2. Composition d'un polymère

Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs. La polymérisation sur la double liaison du monomère correspond à l'ouverture de la double liaison.

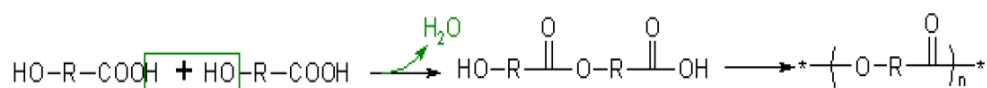


Figure 6.3. Etape de polymérisation

6.3.1.1 Structure et propriétés de polymères :

Les polymères présentent des caractéristiques mécaniques propres. Ils présentent un comportement vitreux lorsqu'ils sont amorphes, des caractéristiques de fibres lorsqu'ils sont cristallisés mais également un comportement visco-élastique. Ces différents états dépendent principalement de la nature chimique du polymère et de la température. La nature chimique des macromolécules est liée à leur origine qui est soit naturelle, soit synthétique.

Leur structure, leur masse moléculaire, leur caractère linéaire ramifié ou non, réticulé ou non déterminent fortement leurs propriétés physico-chimiques. Le paradoxe des macromolécules est que des chaînes très différentes par leur composition chimique peuvent avoir des propriétés physiques analogues. Certains polyesters ou silicones présentent des propriétés viscoélastiques analogues à certains hydrocarbures insaturés. À l'inverse, des polymères à chaînes chimiquement identiques peuvent avoir des propriétés physiques totalement différentes. Un même composé peut être hautement élastique ou complètement amorphe en fonction de la température et de l'arrangement macromoléculaire. Le tableau 6.1 montre les propriétés de quelques polymères utilisés pour la fabrication de BP.

Tableau 6.1. Propriétés de quelques résines.

Résine	Masse volumique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité en traction (GPa)	Coeff de dilatation thermique (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Polyester	1,28	45 – 90	2,5 - 4	100 - 110
Epoxydique	1,3	90 - 110	3 – 7	45 - 65
Phénolique	1,35 – 1,75	45 – 59	5,5 – 8,3	30 - 45

6.3.1.2 Applications de polymères :

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets usuels et courants, dans lesquels, ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Les cinq familles les plus utilisées sont:

- Les polychlorures de vinyles (PVC) : utilisés comme pièces rigides, tuyauterie, films d'étanchéité.
- Les polyéthylènes (PE) : utilisé comme emballages transparents, pièces rigides
- Les polypropylènes (PP) et les polystyrènes (PS) : pièces rigides, fibres;
- Les polyesters saturés: cosmétiques, revêtements de surface, peintures, vernis, plastifiants pour autres polymères; et les polyesters insaturés: films, fibres textiles, matériaux composites.
- les polyuréthanes (PU) : Citons également les élastomères, qui proviennent pour certains de ces différentes familles et ou du caoutchouc naturel, et dont la principale utilisation se trouve dans le domaine des pneumatiques.

6.3.2. Ciment :

Dans les cas des bétons imprégnés par polymère ou bétons modifiés par polymère, Les ciments les plus utilisés sont les ciments portland.

6.3.3. Granulats :

Ils forment le squelette du béton et ils jouent donc un rôle très important dans la composition et la fabrication des bétons en général et le béton de résine en particulier. Ils influent les propriétés mécaniques et physiques du produit fini. La sélection adéquate de granulats peut influencer sur la consistance, la résistance, et la durabilité du matériau. La variation de la quantité des granulats utilisés ainsi que leur granulométrie peut aussi changer considérablement les propriétés finales de matériau.

En principe, tous les granulats qui conviennent pour les bétons classiques peuvent être utilisés dans la fabrication de béton polymère à condition qu'ils soient propres et secs.

Les granulats utilisés dans la plupart des cas sont des sables de granulométrie différente. Le gravier (0,2 à 16 mm) et le sable (0,1 à 0,7 mm) utilisés sont considérés comme des granulats à granulométrie supérieure tandis que la farine (0,1 à 0,3 mm) et les particules encore plus petites (< 0,1 mm) sont considérées comme des granulats fins. Le bon choix des granulats entraîne une augmentation du module d'élasticité, de la résistance en flexion et en compression ainsi que de la dureté.

6.3.3. Matériaux de renforts :

Dans certaines applications de BP, des fibres hachées fines sont utilisées comme un renfort tel que les fibres de verre, carbone, poly-aramide et métallique. Certaines propriétés mécaniques telles que la résistance à la flexion et à la compression, et la ténacité sont améliorées par l'ajout de fibres. Dans les applications structurelles de BP, des barres d'aciers doux et à haute adhérence ont également été utilisés dans la formulation de BP.

6.4 Classification des bétons polymères :

6.4.1 Béton imprégné par polymère (BIP):

Les BIP sont les premiers composites qui sont, depuis la fin des années 1960 aux années 1970, largement connus. Ce système est un composite formé par injection d'un monomère de faible viscosité, généralement le méthacrylate de méthyle MMA sous forme liquide ou gazeuse dans les pores du béton de ciment Portland après durcissement. Bien que les monomères de type liquide sont plus facilement adaptables à l'imprégnation du béton durci.

En règle générale, presque n'importe quelle forme, taille, configuration, qualité de béton (ou mortier) de ciment Portland peuvent être imprégnées, à condition que le monomère ait accès à l'espace vide à l'intérieur du béton. Une partie importante de cet espace est généralement obtenue par l'élimination de l'eau libre des pores par simple séchage. Il est clair que le remplissage de monomères de l'espace disponible dans le réseau poreux du béton détermine si ce composite est partiellement ou totalement imprégné. L'imprégnation totale implique qu'environ 85% de l'espace vide disponible après séchage soit rempli.

Après imprégnation, le béton ou le mortier contenant la quantité souhaitée de monomères est soumis à un traitement de conversion du monomère en polymère (la polymérisation). Les deux méthodes les plus couramment utilisées pour la polymérisation dans les systèmes imprégnés sont appelées thermo-catalytique et promu-catalytique. Une troisième méthode, impliquant des rayonnements ionisants, est moins fréquemment utilisée. Une description du processus simplifié pour les BIP, utilisant la polymérisation thermo-catalytique est montrée dans la figure 6.4.

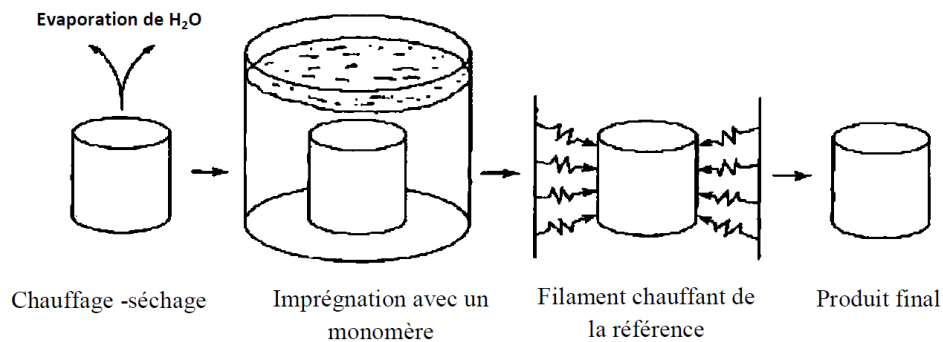


Figure 6.4. Méthode de production de BIP

6.4.1.1. Propriétés du béton imprégné par polymère (BIP):

Généralement, l'imprégnation des bétons affecte positivement plusieurs propriétés importantes, y compris les résistances à la traction, à la flexion et à la compression. Ces nouveaux matériaux imprégnés de polymères présentent, dans la majeure partie des cas, une résistance à la compression égale à quatre ou cinq fois la résistance du béton conventionnel. Aussi une amélioration peut être signalée sur le module d'Young, la résistance à l'abrasion, la résistance à la pénétration et les dommages causés par l'eau, les acides, les sels, et la résistance au cycle de gel / dégel. Le tableau 6.2 montre les propriétés de durabilité des BIP.

Tableau 6.2. Propriétés de durabilité de BIP

		Béton témoin	Béton imprégné de polymère (MMA)	Béton imprégné de polymère (Styrène).
Gel- dégel	Nombre de cycles	740	3650	5440
	Perte de masse (%)	25	2	2
Attaque aux sulfates	Dilatation (%)	0.466	0.006	0.03
	Nombre de jours	480	Non	690
Résistance aux acides (15% HCl)	Perte de masse (%)	27	9	12
	Nombre de jours	105	805	805
Résistance à l'usure	Profondeur d'usure (mm)	1.25	0.38	0.93
	Perte de masse (g)	14	4	6

6.4.1.2. Domaines d'application des BIP:

Avec ses propriétés exceptionnelles, de nombreux domaines d'applications sont recensés, tels que : la préservation des monuments, la réhabilitation des bâtiments anciens et dégradés, la fabrication des tabliers de ponts, les canalisations, les conduits des fluides agressifs, les carrelages, les poutres, les dalles, les trottoirs, les bordures et les revêtements de tunnel. En outre, ils sont utilisés pour la réalisation de panneaux minces préfabriqués ainsi que pour la réparation des surfaces des revêtements routiers dégradés.

6.4.1.3. Inconvénients d'application des BIP:

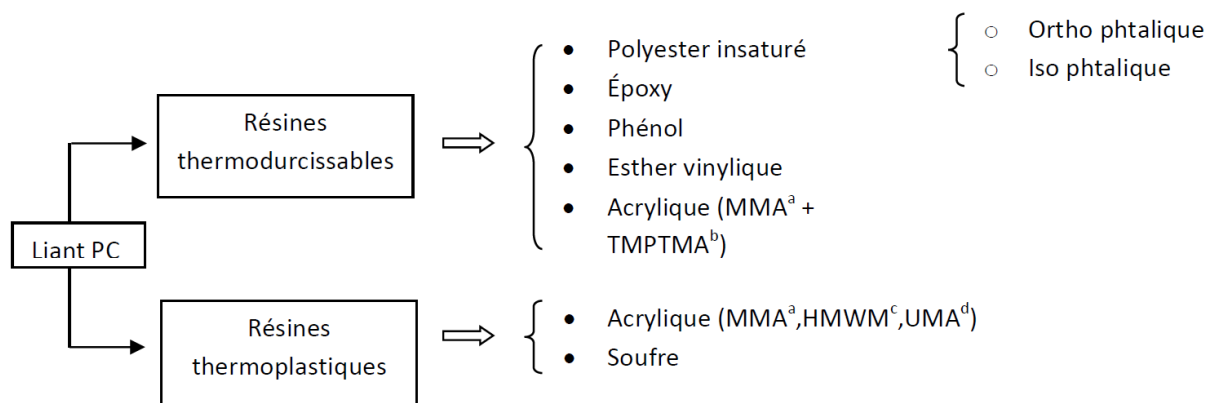
Le principal inconvénient des systèmes imprégnés BIP est leur coût, qui n'est pas économiquement viable. Actuellement, les monomères utilisés pour l'imprégnation sont chers et le procédé de fabrication est plus compliqué par rapport aux produits conventionnels. Aussi, l'imprégnation partielle ne rend pas le béton complètement imperméable, et son exposition à des agents très agressifs, tels que l'acide sulfurique, peut être préjudiciable (le béton ou le mortier peut être attaqué lentement). De plus, la technique d'imprégnation nécessite l'application de la chaleur pour sécher la surface du béton, ce qui peut provoquer la fissuration et entraîner une diminution de la résistance. Toutefois, l'opération d'imprégnation nécessite beaucoup de temps (environ deux jours pour l'imprégnation partielle).

6.4.2 Béton polymère (BP):

Il est connu aussi sous l'appellation de béton de résine synthétique ou de béton de résine plastique ou tout simplement par le béton de résine ou de polymère. Ce système est entré en usage à la fin des années 50 et au début des années 1960, même si les demandes étaient très limitées. Il a d'abord été utilisé dans l'industrie de la construction aux États-Unis, puis en 1958, pour la fabrication innovante de panneaux muraux préfabriqués et marbre artificiel. En Europe, il a été utilisé comme matériau de réparation dès 1961. Cependant, ce n'est que dans la fin des années 60 et le début des années 70, après le développement des BIP, que le BP est rendu plus connu.

Ces composites sont généralement formés par un squelette granulaire et un liant polymère. Ils ne contiennent pas de phase de ciment hydraté, bien que le ciment Portland puisse être utilisé comme une charge « sans l'eau ». Lorsque les renforts sont formés par des sables ou des inclusions de dimensions plus petites, le composite est dit mortier de résine ou de polymère.

Les polymères utilisés pour ce système sont parfois thermoplastiques, mais dans la plupart des cas thermodurcissables.



- a) MMA -le méthacrylate de méthyle ; b) TMPTMA -Triméthacrylate de triméthylolpropane ;
c) HMWM -Méthacrylate de masse moléculaire élevée ; d) UMA -le méthacrylate d'uréthane.

Figure 6.5. Les polymères utilisés pour production de BP

6.4.2.1. Propriétés du béton de polymère (BP):

Le remplacement total de la matrice cimentaire dans le cas des bétons ordinaires par un liant polymérique, se justifie par l'amélioration de ses tenues contre les diverses agressions de types mécaniques, chimiques ou autres. En effet, ce type de matériau présente certains avantages, tels que:

- Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs ;
- Une faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel;

- Un faible coefficient de dilatation thermique ;
- Un durcissement rapide à des températures ambiantes (-18 à 40 °C);
- Une bonne adhérence aux granulats et aux bétons anciens ;
- Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques surtout en traction;
- Une bonne résistance à l'abrasion ;
- Une excellente durabilité avec un coût raisonnable et un faible poids ;
- Ils présentent ainsi un module d'élasticité réduit et ils ont la capacité d'être utilisé avec des couches minces pour des finitions décoratives et architecturales ;

De plus, ils présentent une bonne résistance au fluage.

Le tableau 6-3 montre les différentes propriétés du BP.

Tableau 6.3. Propriétés de BP

Matériau	Masse volumique (kg/l)	Absorption en eau (%)	R _c (MPa)	R _t (MPa)	R _f (MPa)	E (GPa)
Poly-méthacrylate de méthyl	2-2.4	0.05-0.6	70-210	9-11	30-35	35-40
Polyester	2-2.4	0.3-1	50-150	8-25	15-45	20-40
Époxy	2-2.4	0.02-1	50-150	8-25	15-50	20-40
Furane	1.6 - 1.7	0.2	48-64	7-8	-	-
Béton de ciment Portland	1.9-2.5	5-8	13-35	1.5-3.5	2-8	20-30

6.4.2.2. Domaines d'application des BP:

A cause de ses nombreux avantages, le béton polymère est devenu un matériau dominant dans l'industrie de la construction au Japon et en Europe pendant les années 1970 et dans les années 80 aux États-Unis. Ils ont été utilisés dans les applications où il y a un besoin de durabilité, comme pour la fabrication des systèmes de drainage et de canalisation (les regards, les réservoirs d'acides et de confinement des déchets dangereux, etc.). Ils ont été utilisés aussi pour les revêtements de réparation des surfaces et pour les produits préfabriqués. Le tableau 6.4 résume les applications importantes de ces composites.

Tableau 6.4. Domaine d'application de BP

Fonction/ Application	Utilisations finales
Les planchers et les trottoirs	Planchers des maisons, hangars, écoles, hôpitaux, bureaux, magasins, toilettes, couloirs, salles de sport, les usines, les installations industrielles, les escaliers, les garages, les plates-formes de chemin de fer, pistes d'aéroport, etc.
Revêtements d'imperméabilisation	Les toitures en béton, réservoirs d'eau, les fosses, les piscines, les silos, etc.
Revêtements décoratifs	Revêtements muraux, matériaux de revêtement pour finitions texturées de bâtiments, le matériel de préparation de surface pour les revêtements, etc.
Revêtements anticorrosion	Les effluents des drains, coulis pour carreaux résistants aux acides, planchers pour les laboratoires chimiques et pharmaceutiques, bains chauds des resorts, revêtements anticorrosion pour les terrasses avec des toits en acier, etc.
Les revêtements de ponts	Tabliers de ponts, les terrasses des navires internes et externes, les terrasses des passerelles, les étages des trains et des métros, etc.

6.4.2.3. Inconvénients d'application des BP:

Ces systèmes présentent quelques inconvénients. En effet, le coût de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des liants hydrauliques. Sachant que ce coût supplémentaire peut être compensé dans certaines applications par la réduction du coût de la main-d'œuvre et la diminution du prix des produits à base de polymère qui sont plus chers seulement de 10 à 25% que les liants hydrauliques. Cette économie est réalisable compte tenu de plusieurs facteurs comme la diminution de l'économie de matières (jusqu'à 50%) en augmentant les dimensions des produits grâce aux résistances élevées du béton résineux, de la réduction des frais de transport grâce aux volumes plus petits et de la diminution considérable des dépenses d'investissements pendant la fabrication et pendant les opérations de manutention et le stockage comme résultat de décoffrage et de durcissement rapide du matériau, qui diminue l'espace nécessaire pour la production et le stockage des produits finis.

De plus, ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau (la résine et le durcisseur) lors du malaxage et la mise en place. Aussi, le comportement de ces composites aux températures élevées et au feu freine leur développement, surtout lorsqu'on les utilise comme matériau de parement ou pour la décoration intérieure. Puisque les résines sont des substances organiques qui résistent mal à la chaleur et leur exposition prolongée à des températures élevées n'est donc pas recommandée,

car elle entraîne sa dégradation ; ce qui se traduit éventuellement par une perte de sa résistance mécanique.

6.4.3 Béton modifié par polymère (BMP):

Ce matériau dont la teneur en polymère, par rapport au ciment, est supérieure à 5%, a été mis en usage au début des années 1950, et dans les années 1970. Il est devenu l'un des matériaux de construction dominants dans les pays avancés. Il est défini comme un mélange de liant (ciment Portland) et agrégat combiné au moment du mélange à un polymère organique usuellement comme adjuvant. Lorsque les hydrates de ciment et la coalescence du polymère se produisent, une co-matrice est entraînée à travers le béton. En conséquence, une matrice hybride est obtenue, formée par cette co-matrice, ce qui entraîne une amélioration du produit final.

Plusieurs types de polymères sont utilisés pour fabriquer un béton modifié par polymères. Les plus utilisés, se présentent sous forme de dispersion aqueuse que l'on désigne sous le nom de latex. Aussi, il existe les polymères redispersables, les polymères solubles dans l'eau, et aussi les résines liquides (figure 6.6)

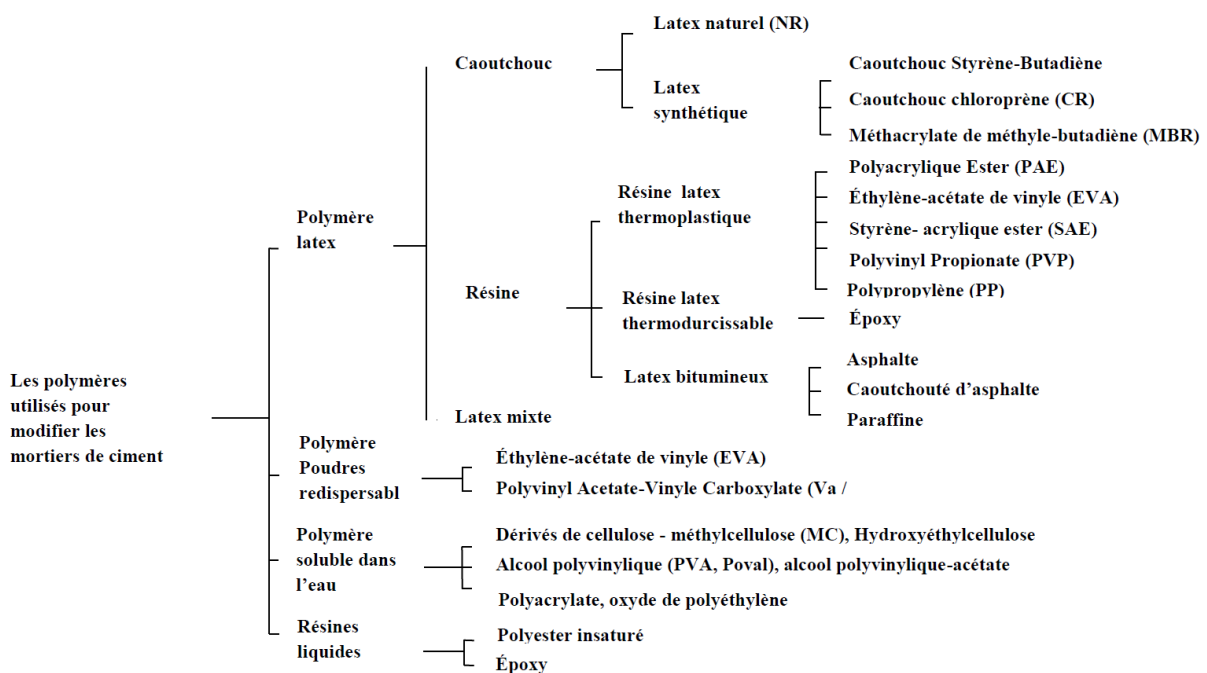


Figure 6.6. Les polymères utilisés pour production de BMP

6.4.3.1. Les bétons modifiés par les poudres redispersables :

Quant aux poudres, le principe est presque le même que celle de la modification par les latex, sauf qu'il comporte à la place de la solution aqueuse (le latex), des poudres re-dispersables de polymère. Ces poudres sont utilisées essentiellement pour la fabrication de mélanges dont les constituants sont : les ciments et les agrégats (généralement de taille < 6 mm), l'eau et les agents anti-mousse si la poudre n'en contient pas. Après l'ajout d'eau, les poudres re-dispersables sont re-émulsionnées dans le mélange cimentier, et se comportent de la même manière que les latex. Le dosage des mélanges de ciment modifiés par des polymères en poudre re-dispersable est similaire à celle des autres systèmes modifiés par des polymères, à l'exception que l'eau n'est pas fournie par le polymère. Le rapport P/C en masse varie de 5 à 20%. Le durcissement des systèmes modifiés est similaire à celui des systèmes modifiés au latex.

Les premières poudres re-dispersables sont à base de polyvinylacétate. Ils ont été développés par Max Ivanovits, chercheur chimiste en 1952. Ces poudres sont obtenues par un procédé en deux étapes. Tout d'abord, les latex de polymères qui sont les matières premières, sont réalisées par polymérisation en émulsion. Ces derniers sont séchés après par pulvérisation pour obtenir ce qu'on appelle les poudres re-dispersables. Avant le séchage par pulvérisation, les latex sont formulés en outre avec des ingrédients tels que des bactéricides, des adjuvants de séchage par atomisation et les agents anti-mousse. Des antiblocages tels que le carbonate d'argile, la silice et le calcium sont ajoutés à la poudre de polymère pendant ou après le séchage par pulvérisation pour empêcher la prise en masse des poudres pendant le stockage.

6.4.3.1.1. Propriétés des bétons modifiés par les poudres redispersables :

L'avantage de l'utilisation des poudres redispersables, c'est que le dosage du mélange est mieux contrôlé, avec le dosage des ingrédients secs qui intervient le plus souvent à l'usine et non sur le chantier, comme lorsqu'on utilise les latex.

En règle générale, les mêmes propriétés signalées pour les bétons après modification par latex sont obtenues aussi pour les mortiers après modification par les poudres redispersables; seulement ces propriétés sont légèrement réduites par rapport à celles du latex de composition analogue. En effet, l'addition des latex aux bétons a tendance à former plus facilement et de manière uniforme un film polymère par rapport à l'addition des poudres redispersables.

6.4.3.1.2. Applications pour les bétons modifiés par les poudres redispersables :

Les poudres re-dispersables sont toujours plus chères que leur équivalent en latex parce qu'ils sont généralement obtenus par un procédé en deux étapes comme nous l'avons précédemment mentionné. Par conséquent, les systèmes modifiés par les poudres sont utilisés lorsque le coût n'est pas un souci majeur et la commodité est plus importante, comme dans des applications qui nécessitent l'utilisation de petites quantités. Les mortiers modifiés par les poudres re-dispersables sont utilisés très efficacement dans :

- Les colles à carrelages en céramique et pour le jointoiement ;
- Pour construire les revêtements des sols industriels ;
- Pour la réparation des structures en bétons et les mortiers ;
- En outre, ces poudres sont utilisées à un degré limité dans les systèmes de finition d'isolation extérieurs.

6.4.3.2. Les bétons modifiés par les polymères solubles dans l'eau :

Ce type de béton modifié comporte des polymères hydrosolubles à la place des latex et des poudres avec des rapports polymère très bas, variant entre 0.5 et 4%, selon le type de polymère utilisé. Ces polymères peuvent être ajoutés sous forme de poudres ou en solutions aqueuses dans les mortiers de ciment au cours du mélange. Lorsqu'ils sont ajoutés sous forme de poudre, il est conseillé de mélanger à sec les polymères avec les mélanges de ciment globaux, puis les mélanger avec de l'eau.

Ce type de modification est appliqué moins fréquemment, parce qu'il existe peu de polymères qui sont solubles dans l'eau. En outre, leur faible solubilité provoque des difficultés lors de leur utilisation comme modificateur de mortier. D'un autre côté, ces polymères ont l'avantage de l'absence d'agents tensio-actifs qui sont utilisés pour maintenir les polymères en solution. L'absence de ces derniers facilite la formation du film polymère, et les propriétés des matériaux peuvent être mieux réglées. Par conséquent, de faibles teneurs en polymère sont nécessaires.

Parmi les polymères utilisés dans ce type de béton, Il existe les polymères non ioniques ayant un atome d'oxygène ou d'azote dans le squelette du polymère. Comme exemple, on peut citer l'oxyde de polyéthylène (PEO) et de polyéthylèneimine (PEI). Il existe également des polymères non ioniques solubles dans l'eau contenant un groupe acrylique, tel que l'acide polyacrylique (PAA) et de polyacrylamide (PAAM). En outre, les polymères solubles de type alcool polyvinylique (PVA) et l'acétate d'alcool de polyvinyle (PVAA) qui sont fréquemment

utilisés pour modifier les mortiers de ciment, appartiennent à la classe des polymères non ioniques solubles dans l'eau contenant un groupe vinyle. Enfin, il y a les éthers de cellulose, comme le méthylcellulose (MC) et l'hydroxyéthylcellulose (HEC), et les polyélectrolytes, comme le sulfate de polystyrène (PSS).

6.4.3.2.1. Les propriétés des bétons modifiés par les polymères solubles dans l'eau :

Les systèmes modifiés par les polymères solubles présentent une rétention d'eau, un entraînement d'air et un effet plastifiant remarquable. Et cela peut grandement contribuer à une amélioration de la maniabilité et à la prévention du phénomène de séchage. De plus, la capacité de rétention d'eau de ces polymères peut contribuer également à une adhérence supérieure aux différents supports poreux tels que les carreaux de céramique, et les matériaux cimentaires. En outre, la capacité de rétention d'eau se traduit souvent par une viscosité accrue ; cela tend à diminuer l'eau libre et la tendance à la ségrégation dans la pâte de ciment. De plus, une homogénéité et une meilleure dispersion des fibres de carbone et d'acier sont obtenues dans la pâte de ciment modifié.

D'autre part, les polymères solubles dans l'eau tendent à diminuer la résistance à la compression en raison de l'augmentation de l'air entraîné, tandis qu'une augmentation de la résistance à la traction est trouvée pour certaines applications. En revanche, la force de liaison entre la pâte de ciment et les granulats, entre la pâte de ciment et des fibres d'acier, et entre la pâte de ciment et les fibres de carbone est améliorée.

De plus, l'amélioration de l'interface entre les granulats et la pâte de ciment peut entraîner aussi une diminution à la fois de la perméabilité et la formation de fissures. Ces polymères même si on les ajoute à de petites quantités, ils ont la capacité de former un film polymère dans le mélange cimentier.

D'une manière générale, le but de la modification des polymères solubles dans l'eau est l'amélioration des propriétés fraîches du béton, tandis que l'impact sur les propriétés mécaniques est considéré comme un effet secondaire.

6.4.3.2.2. Application des bétons modifiés par les polymères solubles dans l'eau :

Ces polymères sont souvent utilisés comme adjuvants pour fabriquer les mortiers adhésifs pour les carreaux de céramiques et les chapes autonivelantes. De plus, ils sont fréquemment utilisés comme des agents de rétention d'eau, appelés modificateurs de rhéologie ou des agents modifiant la viscosité. Ils sont également utilisés pour la réparation des structures détériorées. D'autre part, ces systèmes montrent des propriétés qui les rendent adaptés pour des applications sous-marines.

Les polymères solubles sont utilisés également pour fabriquer les ciments (MDF) qui ont une résistance à la traction très élevée. Ces systèmes sont généralement fabriqués à très faibles rapports eau-ciment variant de 0,08 à 0,2 avec des pressions et des températures élevées. Les polymères solubles dans l'eau les plus fréquemment utilisés pour fabriquer ces ciments sont l'alcool de polyvinyle ou l'alcool de polyvinyle-acétate d'éthyle, le poly-acrylamide et l'hydroxypropylméthylcellulose.

6.4.3.3. Les mortiers modifiés par les résines liquides :

Sont des mortiers modifiés par des polymères visqueux tels qu'une résine époxy, une résine de polyester insaturé ou une résine de polyuréthane.

Le mélange de ce type de composites est semblable à celui des systèmes modifiés au latex; seulement ces résines réagissent, avec des durcisseurs ou des agents de durcissement pour former une structure en réseau (polymères à deux composants).

Usuellement, les mortiers modifiés par les résines liquides sont obtenus en mélangeant d'abord : le ciment, les granulats et la moitié de l'eau de gâchage, puis le durcisseur pré-mélangé avec la résine et le reste de l'eau de gâchage. La teneur en « résine, durcisseur » est pratiquement la même ou supérieure à celui des systèmes de latex modifiés ; les plus pratiquées varient entre 15 à 20%. Néanmoins en Allemagne, on remarque que le durcissement de la résine époxy peut se produire dans le milieu alcalin des mortiers de ciment sans durcisseur. Ils ont observé que les mortiers sont réalisés avec succès, et ont des propriétés supérieures par rapport aux mortiers modifiés par les résines époxydiques classiques (avec durcisseur). De plus, ils ont conclu qu'un rapport polymère-ciment variant de 5 à 10%, est considéré comme optimal pour la préparation de ces nouveaux mortiers. Pour le durcissement, ces systèmes ont l'avantage d'être durcis dans des conditions humides ou mouillées.

6.4.3.3.1. Les propriétés des mortiers modifiés par les résines liquides:

Dans ce type de mortier, la polymérisation est initiée en présence d'eau pour former une phase polymère, alors que l'hydratation du ciment se produit en même temps. Le degré de cette dernière diminue probablement à cause du recouvrement des particules de ciment par les particules de résine, ce qui réduit le contact entre le ciment et l'eau. Par conséquent, l'addition de la résine époxy retarde le durcissement des pâtes et des mortiers. Après durcissement, une phase co-matrice est formée avec une structure combinée de réseau de polymères et une phase d'hydrates de ciment et d'agrégats qui s'interpénètrent ; ce qui les lie fortement. Par conséquent, la résistance et d'autres propriétés du mortier sont améliorées pratiquement de la même manière que ceux des systèmes modifiés par latex. Ce qui signifie une résistance et une

adhérence élevée, une faible perméabilité, et une résistance chimique améliorée tout comme les systèmes modifiés au latex.

6.4.3.3.2. Applications des mortiers modifiés par les résines liquides:

Les polymères liquides sont moins largement employés comme additifs dans les mortiers de ciment Portland par rapport aux autres additifs tels que les latex, les poudres de polymère redispersables et les polymères solubles dans l'eau. Ces résines sont produites pour fabriquer les bétons et les mortiers polymères sans ciment hydraté.

6.4.3.4. Les mortiers modifiés au latex :

Ce sont des mortiers qui comportent un polymère de type latex plus les mêmes ingrédients que les mortiers classiques (ciment, granulats, eau et autres additifs s'ils sont utilisés). Ces mortiers sont préparés en ajoutant aux composants classiques des mortiers (ciment, sable et eau), un polymère sous forme de dispersion aqueuse (latex), souvent utilisé comme adjuvant plastifiant réducteur d'eau.

Le rapport polymère latex / ciment varie de 5 à 20% d'extrait sec de polymère rapporté à la masse du ciment dans le mélange. Les latex de polymère sont d'abord mélangés à l'eau de gâchage, et directement ajoutés au ciment et on mélange ensuite avec les agrégats ; c'est la méthode classique (tableau 6.5). La vitesse et le temps de malaxage doivent être bien choisis pour éviter d'emprisonner de l'air inutile. Les bulles d'air qui se forment lorsque le ciment et les granulats sont mélangés avec une solution aqueuse de polymère ne sont pas faciles à enlever, car ils ont tendance à être stabilisés par les polymères ; ce qui a pour conséquence la diminution de la résistance, même si ce phénomène peut être favorable à l'amélioration de la maniabilité et la durabilité des mortiers.

Tableau 6.5. Méthode de malaxage selon la première méthode

Opérations	Durée des opérations (s)	État du malaxeur
Introduction de l'eau, le latex et l'agent anti-mousse.		Arrêt
Introduction du ciment		
	30	Vitesse lente
Introduction du sable	30	
	30	Vitesse moyenne
Raclage de la cuve	15	Arrêt
	75	
	60	Vitesse moyenne

Une autre méthode propose d'utiliser une approche alternative pour réduire la formation des bulles d'air dans les mortiers modifiés, c'est de pré mouiller le ciment et le sable avec de l'eau, puis ajouter le latex (tableau 6.6).

Tableau 6.6. Méthode de malaxage par pré-mouillage

Opérations	Durée des opérations	État du malaxeur
Introduction de l'eau		Arrêt
Introduction du ciment		
	30s	Vitesse lente
Introduction du sable	30s	
	30s	Vitesse moyenne
Raclage de la cuve	15s	Arrêt
	75s	
	60s	Vitesse moyenne
	120s	Vibration
Introduction de latex	180s	Vitesse lente + vibration

6.5. Avantages de béton de polymère :

- * Une bonne résistance aux agents chimiques et aux agents corrosifs ;
- * Une plus faible perméabilité à l'eau et une bonne résistance aux cycles de gel-dégel;
- * Un faible coefficient de dilatation thermique ;
- * Un durcissement rapide ;
- * Une bonne adhésion aux granulats et aux bétons anciens ;
- * Des résistances mécaniques meilleures que celles des bétons hydrauliques.
- * Une bonne résistance à l'abrasion ;
- * Une durabilité accrue;

6.6. Inconvénients de béton de polymère :

- * Le cout de la matière première (principalement le liant) est plus élevé (jusqu'à 8 fois) comparé à celui des bétons hydrauliques.
- * Ces bétons se caractérisent par une mauvaise odeur et une toxicité provenant de la partie liante du matériau c'est-à-dire la résine et le durcisseur pendant le malaxage et la mise en œuvre.

6.7. Domaines d'application de béton de polymère :

6.7.1. Dans le génie civil et bâtiments :

Le BP est utilisé essentiellement dans la production du marbre artificiel (à matrice polymérique) dont l'attrait de surface et non seulement les propriétés techniques du matériau est d'une importance cruciale. Sur cette base, des exigences un peu particulières sont prescrites pour les granulats, les monomères et les oligomères. A présent, l'industrie de façades s'est enrichie avec l'utilisation du BP comme matériau de revêtement influençant ainsi la conception des façades surtout avec les formes de ces dernières de plus en plus complexes de point de vue architecturale et les exigences économiques et techniques plus strictes. Certes le prix de matière première du BP est 8 fois plus cher que celui de béton hydraulique, mais une contre partie estimée 80% du prix initial est récupérable par la réduction des dimensions des éléments produites grâce aux résistances élevées du BP, la réduction des frais pendant les opérations de production (décoffrage rapide), stockage, manutention et transport. En plus de ces dépenses considérablement diminuées, le BR est une excellente alternative des roches naturelles pour la fabrication des éléments tels que les panneaux, appuis de fenêtres, marches d'escalier, table de travail, haut de table, équipements techniques sanitaires, etc.; le BP peut être considéré comme un matériau ami à l'environnement.

6.7.2. Dans l'agriculture et l'horticulture:

Dans beaucoup de pays, le BP est employé pour réaliser des réservoirs d'aliments pour les porcheries et les fermes de bétails. Les raisons de cette utilisation sont la résistance mécanique, le faible poids et la résistance contre l'action des ammoniacs et des détergents industriels utilisés pour éliminer les bactéries pathogènes afin d'empêcher la contamination des aliments. Comparés avec les réservoirs céramiques, ceux à base de BP sont moins chers et présentent moins de dégâts pendant le service. En horticulture, le BP est utilisé pour fabriquer des petites formes et des bacs pour les plants. Ces conteneurs sont à déplacer selon les conditions météorologiques et c'est ici que réside l'avantage de profiter de BP plus léger et robuste.

6.7.3. Dans les revêtements des chaussés et planchers:

Les planchers dans les établissements industriels sont constamment exposés à des actions mécaniques permanentes exercées par les engins de transport, les vibrations, les impacts, l'abrasion, l'action des agents chimiques (acides, alcalins, graisse, huile et sels) affectant ainsi la qualité de surface ce qui peut engendrer l'endommagement des surfaces non protégées

mettant ainsi la santé des travailleurs en danger et influant négativement sur l'état des machines. Dans les régions à grande variation de température, l'eau pénétrante dans le béton gel et gonfle ce qui engendrent des contraintes menant à la fracture du béton. De même pour les chaussées, le mouvement intensifs des véhicules lourdes essentiellement réduit énormément le freinage à temps et cause l'usure de la surface du béton et par la suite l'augmentation des accidents routiers. Les investigations basées sur des essais en laboratoires et in-situ pour une période de 10 ans ont démontré l'efficacité de cette technique si la résine est bien choisie. Un exemple très connu témoignant du succès quant à l'utilisation du BP pour la protection des surfaces des chaussées est la réparation du pont de Brooklyn à New York. Le revêtement peut supporter la totalité de la charge du trafic après 4 heures de son étalement et la circulation sur le pont n'est pas complètement interrompue puisque le travail est fait voie par voie.

6.7.4. Dans les travaux de drainage et hydrauliques:

L'utilisation du BP pour la fabrication des différents systèmes de drainage et le réseau de canalisation est très répandue comme résultat de la faible absorption d'eau et une résistance exceptionnelle au gel-dégel. Par conséquent, les éléments fabriqués en BP peuvent avoir jusqu'à 15 mm d'épaisseur (réduction de 1/3 du poids par rapport au béton cimentaire pour des produits similaires) et maintiennent leurs poids initiaux après 1600 cycle de gel-dégel tandis que celles produites en béton classique perdent jusqu'à 25% après 750 cycles seulement comme le montre des essais réalisés in-situ. L'utilisation des formulations à base d'époxyde dans plus de 10 installations hydrauliques aux USA ont donné des résultats satisfaisants. Des études similaires sont menées en France et d'autres pays. Des conduites fabriquées en BP ont été utilisées en ex-USSR pour les égouts et les systèmes d'irrigation (milieu agressif avec un PH de 3 à 10, pression de 0,2 MPa) en 1970 ne révélant aucun dégâts après 8 ans de service. Un BP furanique a été utilisé dans le revêtement de la ligne principale des égouts de Prague sur une longueur de 11 Km. La conception adoptée a été fort bénéfique puisqu'elle a réduit à 1/3 la main d'œuvre dans les tunnels et à 1/6 dans les fossés à plein air (une économie de 70% sur la main d'œuvre). Des déversoirs de quelques rivières de l'Asie centrale sont revêtus en BP à base furane (100 à 150 mm d'épaisseur et une aire de 900 m² dans 5 barrages). Pendant 25 ans de service, ces barrages montrent une grande résistance à l'usure causée par le transport des sédiments.

6.7.5. Dans l'industrie:

Le BP est fortement recommandé dans la construction des usines chimiques et dans la fabrication des équipements miniers (électrolytiques, réservoirs, puits, etc.). Des étais et des

traverses de liaison en BP sont fabriqués et utilisés pour la première en ex-URSS vers 1959. Près de 10 km de chantier minier sont supportés par ces étais creux (pour alléger la structure) dans les mines du bassin de Donetsk.

L'introduction des éléments porteurs en BP renforcés supportant les bains électrolytiques a aidé à dépasser les matériaux réfractaires garnis jugés chers et défectueux, à réduire les frais de construction, à améliorer la protection contre l'électrocorrosion, à réduire la main d'œuvre en production par 3, à augmenter la durée de vie en service 5 fois et à réaliser une économie annuelle importante.

Des conteneurs en BP renforcés sont utilisés avec succès pendant plusieurs années par le groupe Saligorsk Potassium poubelles au lieu des anciens en acier qui corrodent entre 6 et 10 mois et deviennent inutilisables.

Des isolateurs en porcelaine montrent des défaillances à 235 KV alors que ceux des BR résistent jusqu'à 250 KV (le coût estimatif d'un isolateur en BP est moins que la moitié du coût de celui en porcelaine). Des super-isolateurs, des supports et des regards de visite ont été confectionnés aux USA, ex-URSS, et Japon en utilisant le BP.

Une application du BP dans le secteur industriel est la fabrication des bases pour des tours, des rectifieuses, des fraiseuses et des perceuses grâce à la qualité anti-vibrations meilleure de 6 à 10 fois que celle du fer, à la stabilité à l'eau et lubrifiants, à la technologie facile de sa production et à la faible conductivité thermique par rapport à l'acier

6.7.6. Dans l'isolation phonique:

Pour produire des systèmes d'isolation phonique (écrans phoniques en autoroutes), le produit doit avoir une bonne résistance mécanique surtout sous l'action des vents intenses et une résistance à l'humidité, aux gaz d'échappement, aux huiles et aux antigels. Il est connu que le BP satisfait tous ces exigences contrairement à plusieurs matériaux. Des renforts comme le verre et le caoutchouc peuvent être utilisés.

6.7.7. Dans le site d'enfouissement des déchets toxiques et radioactifs :

Un important problème se pose à l'industrie nucléaire exponentiellement croissante est le rejet sûr des déchets des produits de fission. L'approche techniquement et économiquement raisonnable adoptée par la commission d'énergie atomique américaine (AEC) est l'immobilisation des produits fissibles et de fission dans un matériau durable à long terme. Ces déchets radioactifs exigeant un stockage à longue durée se présentent sous forme de sels solubles, solution aqueuse (nitrates), oxydes, verres et équipements de production contaminés.

Ils doivent être stockés pendant une période de 1000 ans avant qu'ils puissent être considérés comme biologiquement stables.

Le BP grâce au durcissement rapide, à la faible perméabilité, à la haute résistance mécanique (2 ou 3 fois plus grande que celle du béton conventionnel) et à la résistance aux agents chimiques rend l'utilisation d'un tel matériau favorable pour l'usage dans la gestion de déchets dangereux et les applications récentes ont montré des résultats prometteurs. En effet Quelques formulations ont montré une stabilité aux radiations de 1010 rads, ce qui est équivalent à la totalité de la dose prévue pour 1000 ans d'exposition : le BP peut assurer longévité et la résistance désirée. Le risque résiduel des déchets non traités est alors considérablement réduit une fois confinés dans un espace limité par une barrière avec un couvercle étanche au-dessus (peut être également composé en béton de résine). Comparé aux polymères, les BP sont rentables puisque seulement 20 à 25% (par le volume) du polymère est employé dans le béton composite et comparé au béton cimentaire, le BP est plus résistant et plus durable.

6.7.8. En géothermie:

La disponibilité des matériaux de construction durables et économiques pour manipuler la saumure et la vapeur chaude, à des températures atteignant 260°C, est un sérieux problème dans le développement de l'énergie géothermique. Les saumures produites en géothermie sont généralement caractérisés par des teneurs en sel élevées, des faibles PH, de dioxyde de carbone et de l'hydrogène sulfuré dissous et des quantités de sulfate de calcium, de carbonate de calcium et de silice. Ces composés dissous dans l'eau à des températures élevées, rendent la saumure très corrosive à beaucoup de matériaux de construction ce qui affecte la durée de vie des usines géothermiques et la quantité d'énergie produite.

Des bénéfices importants sont enregistrés en remplaçant l'usage des conduites en acier inoxydable, tantale et des alliages Hastelloy par des conduites en BP. Comme conséquence de cette économie quant aux frais des usines, le prix du courant électrique fourni est réduit de 9,7%.

6.8. Conclusion :

Le béton polymère est un matériau composé de différents types d'agrégats. Ces derniers sont liés par des résines pour assurer la solidité de mélange. Le béton polymère est une excellente alternative au béton traditionnel. En effet, il possède une résistance mécanique à la compression de très haut niveau. Il possède aussi un pourcentage d'absorption de l'eau quasi nul, ce qui lui confère une totale étanchéité. Il se caractérise par une durabilité accrue et

supporte très bien les passages du gel au dégel, ainsi que l'usure par abrasion. De faible dimension, le béton polymère facilite l'organisation des chantiers et en améliore le rendement en raison de sa simplicité d'installation et de manipulation.

Références :

- Aïtcin, P.C. (1998), Les différents types de retrait du béton, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 215 - réf. 4184 - pp. 41-51, France.
- Akchiche, H. (2020), Modélisation de fissuration en flexion et du retrait des bétons de fibres de palmier dattier, Thèse de Doctorat en Sciences, Université kasdi merbah, Ouargla, Algérie.
- Association française de génie civil (2018), Recommandations : bien prescrire les bétons ; classe d'abrasion, France.
- Belaribi Omar, (2015), Durabilité des bétons autoplaçants à base de vase et de pouzzolane, Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie.
- Belghit, C. (2009), Contribution a la formulation d'un béton autoplaçant à base de matériaux locaux effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité, Thèse de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- Benaïcha, M. (2013), Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales : Optimisation pour améliorer le coulage, la résistance au jeune âge et la durabilité des bétons, Thèse de Doctorat, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc.
- Benali, Y. (2018), Etude du comportement mécanique et de durabilité des mortiers de polymères modifiés au latex, Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle LMD, Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen, Algérie.
- Benamara, D. (2011), Formulation et étude d'un béton à haute performance (BHP), Thèse de Doctorat en Sciences, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- Benouis, H. B. (2019), Etude de béton à base de polymère, Mémoire de Master en structures, Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, Algérie.
- Benzannache, N. (2017), Caractérisation mécanique des bétons polymères à base de résine renforcés par des granulats, Thèse de Doctorat, Université 08 Mai 1945 - Guelma, Algérie.
- Berbaoui, R. (2010), Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère, Thèse de Doctorat, Université du Maine, France.
- Blaga A., Beaudoin, J.J.(1986), Le béton modifié aux résines, Archives des publications du CNRC, Canada.
- Boukezzoula, A. (2014), Contribution à la modélisation du fluage des bétons «Application au béton Autoplaçant », Thèse de Magister, Université Constantine 1, Algérie.
- Boussaha, S. (2019), Etude des propriétés du béton à base de polymère, Mémoire de Master en structures, Université 08 Mai 1945, Guelma, Algérie.
- Casanova, P. (2010), Bétons renforcés de fibres métalliques : Du matériau a la structure, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Chadli, M. (2019), Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés, thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- Collection technique cimbéton, (2006), Des bétons courants vers les bétons Aux nouvelles performances, Cahier des modules de conférence,pour les écoles d'architecture, France.
- Collection technique cimbéton, (2008), Les bétons et la sécurité incendie, Cahier des modules de conférence,pour les écoles d'architecture, France.

- Elalaoui, O. (2012), Optimisation de la formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise (France) et Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (Tunisie).
- Fedaoui-Akmoussi, O. (2016), Etude du comportement mécanique et durabilité des bétons fibrés : influence de différents environnements et de la nature des fibres, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- Feraht, N. (2012), Influence de la variation des caractéristiques mécaniques sur le comportement des éléments en béton armé, Mémoire de Master en Structures et matériaux, Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, Algérie.
- Guellil, M. K. (2012), Formulation des bétons autoplaçants par la méthode de la pate en excès, Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen, Algérie.
- Kliel, H. (2022), Etude expérimentale d'un béton de poudre réactive fibré à base de sable de dune, Mémoire de Master en matériaux en génie civil, Université Mohamed khider –Biskra, Algérie
- Lakhal, R. (2011), Elaboration des bétons a hautes performances a base des sous produit locaux formulation et caractérisation physico-mecanique, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- Lanez, M. (2005), Contribution à l'étude des bétons de poudres réactives, Mémoire de Magister en génie civil, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie.
- Malou, M. (2007), Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. Caractérisation - comportement monotone –microstructure, Thèse de Doctorat d'état, Université mentouri-constantine, Algérie.
- Nguyen, V.T. (2013), Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température : application à des éprouvettes de grandes dimensions, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.
- Paul, D.M. Techniques et procédés de mise en œuvre – essais et contrôles, Air occlus, Fiche technique, Laboratoire travaux béton, France.
- Saadi, I. (2017), Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons à hautes performances « Effet des additions minérales et fibres de polypropylène », Thèse de Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- Tabet, N. (2012), Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-chimique des bétons autoplaçants fibrés BAPF, Mémoire de Magister en sciences et génie des matériaux, Université Mohamed Bouguara, Boumerdes, Algérie.
- Tebbal, N. (2017), Effet de la nature des granulats sur les propriétés physicomécaniques et durabilité d'un béton à haute performance, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, Algérie.
- Torrenti, J.M, Le Roy. R. (2015), Analyse et modélisation du fluage propre du béton, Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.
- Verhoven, I.K. (1998), Retrait du béton, bulletin est publié par la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge:FEBELCEM, Belgique.
- Yahiaoui, W. (2018), Durabilité du béton autoplaçants en climat chaud, Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Blida 1, Algérie.

Zaidi, h. (2020), Caractérisation mécanique d'un béton auto plaçant à partir d'un essai d'indentation, Mémoire de Master en Matériaux en génie civil, Université Mohamed el bachir El Ibrahimi, Bordj bou arreridj, Algérie.

Sites internet :

<https://www.planete-tp.com/>

<https://www.toutsurlebeton.fr/>

<https://www.concretedispatch.eu/>

<https://blog.hannaservice.eu/fr>

<https://www.betonsfeidt.lu/>

<https://www.memoireonline.com/>

<https://www.rapport-gratuit.com/>

<https://www.laboratuar.com/>

<https://www.becosan.com/>

<https://www.lemoniteur.fr/>

<https://www.infociments.fr/>

<https://fr.wikipedia.org/>