

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 août 1955. Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie-Civil

Polycopié des cours

## **Bétons innovants 2**

Au profit des étudiants de :

**Master 2. Matériaux en Génie civil**

Présenté par :

**Dr. KHERRAF Leila**

Année universitaire 2023 /2024

# Préface

Ce support de cours répond au canevas ministériel portant sur le cours de « **Bétons innovants 2** », adressé aux étudiants de la deuxième année Master, spécialité « Matériaux en Génie civil.

Le but de ce polycopié est de familiariser les étudiants avec les nouveaux types de bétons, en mettant l'accent sur leurs aspects techniques et environnementaux. Il vise à présenter en détail les composants, les caractéristiques fondamentales, et les méthodes clés de formulation de ces bétons. En plus de cela, il explore les technologies employées pour leur fabrication et leur contrôle, tout en analysant leurs domaines d'application ainsi que leurs avantages et inconvénients.

En effet, c'est un contenu composé principalement de six chapitres.

Le premier chapitre traite les bétons de masse, le second, les bétons des chaussées, le troisième expose le béton prêt à l'emploi. Dans le quatrième chapitre on s'intéresse aux bétons réfractaires. Les bétons projetés sont présentés dans le cinquième chapitre et dans le dernier chapitre, on présente les bétons pompés.

Enfin le document est clos par une liste des références bibliographiques utilisées pour la rédaction du support de cours.

**Dr KHERRAF Leila**

## **CHAPITRE 1**

### **Bétons de masse**

# Bétons de masse

---

## Sommaire

---

1.1 Introduction .....	1
1.2. Définition .....	2
1.3. Histoire.....	2
1.4. Composition du béton de masse.....	3
1.5 Problèmes du béton de masse.....	5
1.6. Conception de mélange de béton de masse .....	6
1.7. Propriétés du béton de masse .....	6
1.8. Transport- Mise en oeuvre et contrôle du béton de masse.....	7
1.9. Avantages du béton de masse .....	8
1.10. Inconvénients du béton de masse.....	8
1.11. Domaine d'application .....	9
1.12. Études de cas de projets réussis en béton de masse .....	11
1.13. Impact du béton de masse sur l'environnement.....	13
1.14 Conclusion .....	15

### 1.1 Introduction

Le béton de masse est une technique de construction conçue pour fournir stabilité, durabilité et résistance dans des applications où des charges ou des forces importantes sont prévues. La réalisation d'un élément en béton de masse parfait et structurellement solide nécessite des connaissances techniques et une expérience substantielles en termes de conception, de mise en oeuvre et de surveillance. Dans ce cours, nous explorerons en détail la définition, la composition, les techniques de sa mise en oeuvre, les domaines d'applications, en mettant l'accent sur son importance dans l'industrie de la construction modern et son impact environnemental.

## 1.2. Définition

Le béton de masse est défini comme un ouvrage en béton de gros volume avec de grandes dimensions et des conditions aux limites sujettes à des températures élevées en raison d'un taux plus élevé de chaleur d'hydratation. Le terme "masse" dans béton de masse indique la quantité importante de béton utilisée dans un seul coulage ou dans un élément structural spécifique.

La température élevée du béton entraîne des contraintes thermiques élevées, des fissures et un gain de résistance à long terme réduit. Par conséquent, le principal facteur distinguant le béton de masse du béton normal est son comportement thermique.

En général, toute mise en place de béton structural d'une dimension minimale de plus de 36 pouces ou plus est considérée comme du béton de masse.



Figure 1-1 : Béton de masse

## 1.3. Histoire

Historiquement, en Grande-Bretagne, le béton de masse désignait le béton ancien sans armature coulé sur place à l'aide de coffrages. Il a été utilisé principalement entre 1850 et 1900 sur une variété de bâtiments, principalement comme matériau de mur ou là où la masse était nécessaire pour la gravité, comme dans les barrages, les réservoirs, les murs de soutènement et les structures maritimes. À cette époque, le terme n'était pas officiellement défini et ne contenait aucune connotation aux grandes dimensions générant de la chaleur à partir de l'hydratation du ciment, car ces occurrences n'étaient pas encore comprises.

Pendant la révolution industrielle, il y avait une demande croissante pour de nouvelles

infrastructures afin de soutenir l'expansion industrielle et urbaine. Le béton de masse, avec sa capacité à être coulé en grandes quantités et à durcir rapidement, est devenu un matériau de construction idéal pour répondre à cette demande croissante. Il a facilité une construction plus rapide et plus économique, favorisant ainsi le développement économique et industriel.

De plus, le béton de masse a joué un rôle crucial dans la construction des chemins de fer, qui étaient vitaux pour le transport des marchandises et des personnes sur de longues distances. Les ponts en béton ont permis de franchir des obstacles naturels tels que les rivières et les vallées, facilitant l'expansion des réseaux ferroviaires.

De nos jours, le béton de masse continue d'être utilisé dans la construction moderne pour son excellente intégrité structurelle et sa durabilité. Les architectes et les concepteurs modernes tirent parti de la polyvalence du béton de masse pour créer des structures innovantes et esthétiquement plaisantes. Sa capacité à être moulé dans différentes formes, textures et finitions permet de concrétiser des visions architecturales diverses, des gratte-ciel urbains élégants aux monuments culturels aux formes organiques.

#### **1.4. Composition du béton de masse**

Le béton de masse est essentiellement du béton normal avec une proportion plus élevée d'agrégats grossiers et une proportion moindre de ciment.

Les caractéristiques du ciment, des pouzzolanes, des adjuvants, des granulats et de l'eau utilisés pour la construction en béton de masse sont les suivantes :

##### **a) Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation**

Le ciment Portland peut être utilisé avec des pouzzolanes ou tout autre type de ciment pour le béton de masse. Au cours du processus, le dosage est effectué séparément à la centrale de malaxage. Limiter la teneur en ciment peut réduire la température et aider à réaliser des économies.

##### **b) Pouzzolanes et laitier de Haut fourneau granulé broyé**

Les pouzzolanes dans le béton de masse réduisent la génération de chaleur interne, améliorent la maniabilité, réduisent la possibilité de réaction alcali-agrégat et offrent une meilleure économie. Cependant, les propriétés des pouzzolanes varient. Par conséquent, ils doivent être testés combinés avec le ciment du projet pour mesurer sa contribution au béton de masse.

Le laitier de Haut fourneau granulé broyé ou ciment de laitier est utilisé séparément du ciment Portland dans le béton de masse. L'incorporation de scories réduit le taux de génération de

chaleur car ils diminuent le taux d'hydratation. Ils réduisent également la perméabilité, l'expansion des agrégats réactifs et améliorent la maniabilité.

### **c) Granulats**

Les granulats fins doivent être constitués de fragments de roche durs, denses, durables et non revêtus, et ne doivent pas contenir de grains nocifs d'argile, de limon, de poussière, de mica, de matière organique ou d'autres impuretés à un point tel qu'ils affectent négativement les propriétés souhaitées de béton. Les granulats grossiers sont définis comme du gravier, du gravier concassé ou une roche concassée, ou un mélange de ceux-ci, généralement dans la plage de 4,76 mm à 150 mm.

Les granulats grossiers doivent également être constitués de fragments de roche durs, denses, durables et non revêtus. Les roches très fragiles ou qui ont tendance à se dégrader lors du traitement, du transport ou du stockage doivent être évitées. De plus, les roches ayant une absorption supérieure à 3 % ou une densité inférieure à 2,5 ne sont pas considérées comme convenant au béton de masse.

La forme des particules d'agrégat affecte la maniabilité et, par conséquent, les besoins en eau. Les particules rondes offrent la meilleure maniabilité. Plus de 25 % de particules plates (rapport largeur-épaisseur supérieur à 3) et allongées (rapport longueur-largeur supérieur à 3) ne devraient pas être autorisées dans chaque groupe de taille. L'eau utilisée pour préparer le mélange de béton de masse ne doit pas affecter de manière significative la réaction d'hydratation du ciment Portland ni interférer avec les phénomènes censés se produire lors du mélange, de la mise en place et du durcissement du béton. L'eau propre à la consommation humaine est acceptable pour une utilisation dans le béton de masse.

Dans le cas du béton structural pour grandes poutres et colonnes, un granulats de 20 à 30 mm convient. Pour les barrages, un agrégat de 40 mm peut être utilisé.

### **d) Eau de mélange**

L'eau de mélange doit être très faible pour donner un faible affaissement (0-50 mm). Elle doit être exempte de matériaux qui affectent de manière significative la réaction d'hydratation du ciment Portland.

### **e) Adjuvant**

Les principaux adjuvants chimiques utilisés pour le béton de masse sont les entraîneurs d'air, les réducteurs d'eau et les réducteurs de prise. Les adjuvants chimiques aident à réduire la

chaleur d'évolution lors du durcissement du béton de masse. En plus de cela, ils aident à augmenter la résistance, la durabilité, l'abrasion et la résistance à l'érosion.

### 1.5 Problèmes du béton de masse

Au fur et à mesure que le béton durcit, le noyau de l'élément en béton devient la zone où se produit la température maximale. L'élément se refroidit de l'extérieur vers l'intérieur et le noyau peut mettre des années à s'installer complètement. Au cours de cette phase, le principal problème est la formation d'ettringite retardée (DEF) où l'ettringite requise ne se forme pas lorsque cela est nécessaire et laisse l'élément plus faible. Il s'agit d'un sous-produit négatif lorsque la température d'un élément en béton est trop élevée et empêche les formations d'ettringite nécessaires de se produire. Les résultats ne seront visibles que des années plus tard, car l'absence des formations correctes provoquera des fissures et une expansion du béton, affectant gravement la résistance des éléments. Le DEF est un problème lorsque la température de l'élément dépasse 158 °F (70 °C) et entraînera des problèmes de durabilité et de durée de vie (Le DEF se dilate avec le béton avec le temps, ce qui entraîne une fissuration importante).

Les fissures thermiques observées dans diverses structures en béton de masse sont énumérées ci-dessous :

Type de structure massive en béton	Forme de fissure thermique
Grande Fondation	Fissures de carte aléatoires
Des murs	Série de fissures verticales, plus larges à la base
Poutres	Fissures uniformément espacées perpendiculaires à la dimension la plus longue de la poutre

Les principaux facteurs pouvant influencer la température du béton sont :

- Composition et finesse du ciment
- Teneur en granulats et son coefficient de dilatation thermique
- La géométrie de la section
- La température des matériaux
- La température lors du placement.

## 1.6. Conception de mélange de béton de masse

La conception du mélange doit être faite de manière à réduire la chaleur d'hydratation. Une attention doit être portée aux facteurs suivants pour minimiser les effets thermiques.

- L'utilisation d'une faible teneur en ciment et l'utilisation d'un substitut de ciment tel que les cendres volantes [les cendres volantes de classe F sont plus appropriées et le GGBFS pourraient minimiser l'augmentation de la température.
- L'élévation de la température à cœur doit être limitée en dessous de 70-75 °C.
- La différence de température entre le noyau et la surface doit être limitée à 20-25 °C.
- La réalisation d'un test de maquette pour mesurer la limitation ci-dessus est atteinte. Si ce n'est pas le cas, apportez les modifications nécessaires à la conception du mélange. Cela peut être fait par le processus de surveillance continue de la température du béton de masse.
- Le refroidissement des granulats, l'ajout d'eau réfrigérée, le bétonnage de nuit, etc. sont quelques-uns des aspects clés à prendre en compte pour réduire l'augmentation de la température.

## 1.7. Propriétés du béton de masse

Il est essentiel de connaître les propriétés et le comportement du béton avant son application et son utilisation dans tout type de construction :

### a) Maniabilité

Les mélanges de béton de masse doivent présenter une maniabilité appropriée pour faciliter les opérations de construction, réduire les vides et obtenir une consolidation adéquate, surtout lors de grands coulages ou dans des espaces confinés.

### b) Résistance

En ce qui concerne la résistance du béton de masse, il ne nécessite pas de résistance à la compression plus élevée, contrairement à d'autres ouvrages en béton. En effet, il existe une grande surface de béton pour supporter les contraintes appliquées. Ainsi, ce type de béton est utilisé dans la structure où la résistance du béton n'est pas exigée.

### c) Retrait

Pour des constructions massives, des fissures peuvent survenir lorsque la différence de température entre le cœur et la surface est supérieure à 15 °C, ou lorsque durant le séchage des

couches extérieures, il se produit un retrait de ces couches. Les fissures de coffrage ne font en général que quelques centimètres de profondeur et peuvent se refermer plus tard. Une conception de mélange appropriée, l'utilisation d'adjuvants réducteurs de retrait et des techniques de précontrainte peuvent aider à atténuer les fissures et à minimiser le retrait.

#### **d) Perméabilité du béton**

La perméabilité du béton dépend de la porosité du béton. La porosité peut être contrôlée par les facteurs suivants :

- Ajuster le rapport eau-ciment tout en respectant les exigences de conception du mélange ;
- Effectuer un compactage adéquat du béton ;
- Durcissement adéquat;
- Propriétés du ciment - sélectionner le type de ciment approprié ;
- Utilisation d'adjuvants;
- Types d'agrégats utilisés.

#### **e) Durabilité**

La sélection de la qualité du béton, du rapport eau-ciment, de la teneur minimale en ciment et du type de ciment doit être effectuée conformément aux exigences de durabilité.

### **1.8. Transport- Mise en oeuvre et contrôle du béton de masse**

Une fois le béton mélangé, il est chargé dans des camions ou des véhicules de transport équipés d'agitateurs pour maintenir l'uniformité et éviter la ségrégation pendant le transport.

Le béton est transporté de la centrale à béton au chantier de construction à l'aide de camions ou d'équipements spécialisés. Des procédures de manipulation et de transport soigneuses sont suivies pour éviter la prise, la ségrégation ou la perte de maniabilité pendant le transport.

La livraison du béton doit être soigneusement coordonnée avec les activités de construction pour assurer un placement en temps voulu et éviter les retards. Une planification et une logistique appropriées optimisent l'efficacité et réduisent les temps d'arrêt sur le chantier de construction.

La mise en œuvre et le contrôle du béton de masse impliquent une série d'étapes coordonnées pour garantir la construction réussie de grandes structures en béton. Voici un aperçu de chaque phase :

- Utiliser un faible dosage en ciment avec un faible développement de chaleur ;
- Mettre en place le béton par couches (épaisseur de couche < 80 cm) ;
- Garantir, par le retardement des couches inférieures, qu'après la mise en place des couches supérieures, toute la coupe transversale puisse être ultérieurement compactée ;
- Répartition correcte des joints et des segments de bétonnage afin de permettre des mouvements de dilatation et une dissipation de la chaleur ;
- Après le placement, la surface du béton peut être finie à l'aide de taloches, de règles ou d'autres outils pour obtenir la texture, la lissitude et l'apparence désirées. Les opérations de finition doivent être effectuées rapidement pour éviter les défauts de surface et garantir l'uniformité sur toute la structure.
- Pratiquer un traitement de cure au moyen de nattes thermiques ;
- La surveillance de la température du béton pendant l'hydratation est essentielle pour prévenir les fissures thermiques et garantir un durcissement approprié. Les thermocouples ou les capteurs de température intégrés dans les structures en béton fournissent des données en temps réel sur l'évolution de la température, permettant une intervention rapide si nécessaire.
- Les tests de résistance et la détection des fissures, sont mises en œuvre tout au long du processus de construction.

### **1.9. Avantages du béton de masse**

- Ils sont utilisés pour construire d'énormes sections de murs où l'armature en acier n'est pas disponible.
- La construction est rapide en termes de travaux de béton.
- Le béton de masse peut être moulé dans différentes formes et tailles pour répondre à différents besoins architecturaux et techniques, offrant ainsi une flexibilité dans la conception et la construction de structures diverses, des barrages et des ponts aux bâtiments de grande hauteur et aux projets d'infrastructure.

### **1.10. Inconvénients du béton de masse**

- Le béton de masse génère de la chaleur pendant l'hydratation, ce qui peut entraîner des fissures thermiques et une réduction de la résistance s'il n'est pas correctement contrôlé. L'accumulation excessive de chaleur peut nécessiter des systèmes de refroidissement spécialisés et une surveillance attentive pendant la construction.

- Le béton de masse subit une variation de volume pendant l'hydratation et le refroidissement, ce qui entraîne un retrait et des fissures potentielles s'il n'est pas correctement traité. Une conception de mélange appropriée, des méthodes de cure et des joints de contrôle sont essentiels pour minimiser la variation de volume et garantir l'intégrité structurale.
- Manipuler et placer de grands volumes de béton pose des défis logistiques en termes de transport, de placement et de consolidation, notamment dans des endroits éloignés ou inaccessibles. Des équipements spécialisés et des techniques de construction peuvent être nécessaires pour surmonter efficacement ces défis.
- La production de ciment, un composant clé du béton, est associée à des émissions de carbone significatives et à un impact environnemental. La construction en béton de masse peut contribuer à l'épuisement des ressources, à la perturbation des habitats et à la pollution si elle n'est pas gérée de manière durable.
- Le béton de masse nécessite une cure appropriée pour atteindre une résistance et une durabilité optimales. Des méthodes de cure telles que la cure à l'eau, la cure humide ou les composés de cure sont essentielles pour maintenir des niveaux d'humidité et des conditions de température adéquats pendant l'hydratation.

### **1.11. Domaine d'application**

Le béton de masse trouve de nombreuses applications dans divers domaines de la construction en raison de sa résistance, de sa durabilité et de ses propriétés thermiques.

Voici quelques domaines d'application courants :

#### **a) Structures hydrauliques**

Le béton de masse est largement utilisé dans la construction de barrages, de déversoirs, d'écluses et de réservoirs en raison de sa capacité à résister aux pressions hydrauliques et à fournir une stabilité sous l'eau. Les structures massives en béton des barrages et des déversoirs résistent à l'érosion et au flux d'eau, garantissant une gestion sûre et efficace de l'eau.

#### **b) Fondations et semelles**

Les fondations et les semelles en béton de masse fournissent un support stable pour les structures lourdes telles que les bâtiments, les ponts et les installations industrielles. La haute résistance à la compression et la stabilité du béton de masse aident à répartir uniformément les charges et à prévenir les tassements ou les affaissements.

### **c) Construction de ponts**

Le béton de masse est utilisé dans la construction d'appuis de pont, de piles et de fondations pour supporter le poids des tabliers de pont et les charges de circulation. La durabilité et la résistance à l'érosion font du béton de masse un matériau idéal pour résister aux conditions environnementales difficiles rencontrées dans la construction de ponts.

### **d) Centrales nucléaires**

Le béton de masse est utilisé dans la construction de structures de confinement, de bâtiments de réacteurs et de murs de protection contre les radiations dans les centrales nucléaires. Les propriétés denses et résistantes aux radiations du béton de masse assurent un confinement efficace des matériaux radioactifs et garantissent la sécurité et l'intégrité des installations nucléaires.

### **e) Revêtements de tunnels**

Les revêtements en béton de masse sont utilisés dans la construction de tunnels pour fournir un soutien structurel et une étanchéité à l'eau. Les revêtements en béton épais résistent aux pressions externes exercées par le sol ou les formations rocheuses environnantes et protègent l'infrastructure du tunnel contre l'infiltration d'eau et la corrosion.

### **f) Fondations d'éoliennes**

Les fondations en béton de masse sont couramment utilisées pour ancrer les éoliennes dans les parcs éoliens terrestres et maritimes. Le poids substantiel et la stabilité des fondations en béton de masse aident à ancrer les éoliennes en toute sécurité et à résister aux charges dynamiques dues au vent et aux vagues.

### **g) Gratte-ciel**

Dans la construction de gratte-ciel, le béton de masse est utilisé pour les noyaux de construction, les cages d'ascenseur et les murs de cisaillement afin de fournir une stabilité structurale et de résister aux charges latérales telles que le vent et les forces sismiques. La haute résistance et la rigidité des éléments en béton de masse contribuent à la stabilité et aux performances globales des bâtiments de grande hauteur.

### **h) Murs de soutènement**

Les murs de soutènement en béton de masse sont utilisés dans les projets de génie civil pour stabiliser les pentes, contrôler l'érosion et soutenir les remblais. Le poids et la stabilité des murs en béton de masse assurent un confinement efficace et empêchent le mouvement des sols dans les terrains difficiles.

### **i) Chaussée rigide**

Les chaussées rigides sont quelques exemples d'utilisation de béton de masse. Le béton est posé comme matériau de chaussée pour des volumes plus importants.

## **1.12. Études de cas de projets réussis en béton de masse**

Plusieurs projets réussis en béton de masse illustrent les techniques et les technologies innovantes utilisées pour surmonter les défis et obtenir des résultats remarquables :

### **a) Barrage des Trois Gorges, Chine**

Le barrage des Trois Gorges sur le fleuve Yangtsé est l'une des plus grandes centrales hydroélectriques du monde et un exploit remarquable de construction en béton de masse. Terminé en 2006, le barrage a nécessité le coulage de quantités massives de béton, soit environ 28 millions de mètres cubes, pour créer la plus grande structure en béton du monde. Des systèmes de refroidissement avancés, des conceptions de coffrage et des mesures de contrôle de la température méticuleuses ont été mises en œuvre pour gérer la génération de chaleur et prévenir la fissuration thermique pendant la construction.



Figure 1-2 : Barrage des Trois Gorges, Chine

### b) Burj Khalifa, Émirats Arabes Unis

Le Burj Khalifa à Dubaï, le plus haut gratte-ciel du monde, présente un noyau en béton armé massif qui assure la stabilité structurelle et le soutien de sa hauteur vertigineuse. Construit avec du béton à haute résistance et des systèmes de coffrage avancés, le noyau du Burj Khalifa s'élève à plus de 600 mètres, démontrant l'efficacité des techniques modernes de béton de masse pour atteindre des hauteurs architecturales sans précédent.



Figure 1-3 : Burj Khalifa, Émirats Arabes Unis

### c) Barrage d'Itaipu, Brésil/Paraguay

Le barrage d'Itaipu, situé sur le fleuve Paraná entre le Brésil et le Paraguay, est l'un des plus grands barrages hydroélectriques du monde. Construit dans les années 1970 et 1980, le barrage a nécessité le coulage de plus de 12 millions de mètres cubes de béton pour créer sa structure massive. Des méthodes de construction innovantes, notamment le coulage continu à l'aide de systèmes de glissement et des mesures méticuleuses de contrôle qualité, ont assuré la réussite de ce projet ambitieux.



Figure 1-4 : Barrage d'Itaipu, Brésil/Paraguay

#### **d) Barrage de Hoover, États-Unis**

Le barrage de Hoover, une merveille d'ingénierie renommée située à la frontière de l'Arizona et du Nevada, est un autre exemple notable de construction en béton de masse. Construit pendant la Grande Dépression dans les années 1930, le barrage a nécessité le coulage d'environ 3,25 millions de mètres cubes de béton pour créer sa structure massive en forme d'arche-gravité. Des conceptions avancées de mélanges de béton, des techniques de scellement de joints et des mesures de contrôle de la température ont été utilisées pour garantir la durabilité et la stabilité à long terme du barrage.



Figure 1.5 : Barrage de Hoover, États-Unis

#### **e) Tours Petronas, Malaisie**

Les tours Petronas à Kuala Lumpur, en Malaisie, présentent un noyau en béton armé qui assure le soutien structurel de leurs iconiques tours jumelles. Construites avec du béton à haute résistance et des systèmes de coffrage innovants, les tours témoignent de la mise en œuvre réussie de techniques de béton de masse pour atteindre l'excellence architecturale et l'intégrité structurelle.



Figure 1-6 : Tours Petronas, Malaisie

### **1.13. Impact du béton de masse sur l'environnement**

L'impact du béton de masse sur l'environnement englobe plusieurs aspects, notamment les émissions de carbone, l'épuisement des ressources, la perturbation des habitats et la consommation d'eau :

#### **f) Émissions de carbone**

La production de ciment, un composant clé du béton, est une source majeure d'émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La calcination du calcaire dans les fours à ciment libère du CO<sub>2</sub>, contribuant aux émissions de gaz à effet de serre et au changement climatique. De plus, la nature énergivore de la production de ciment aggrave encore son empreinte environnementale.

#### **g) Épuisement des ressources**

L'extraction des matières premières pour la production de béton, telles que le calcaire, le sable et les granulats, peut entraîner la destruction des habitats, la dégradation des terres et la perte de biodiversité. Les activités minières associées à l'obtention de ces matériaux peuvent perturber les écosystèmes, fragmenter les habitats et épuiser les ressources naturelles.

#### **h) Perturbation des habitats**

Les projets en béton à grande échelle, tels que les barrages et les développements d'infrastructures, peuvent causer une perturbation significative des habitats et une fragmentation, entraînant une perte de biodiversité et de services écosystémiques. L'altération des régimes de débit d'eau, des modèles de transport des sédiments et du couvert végétal peut avoir des impacts écologiques profonds sur les écosystèmes fluviaux et terrestres.

#### **i) Consommation d'eau**

La production de béton nécessite de grands volumes d'eau pour le mélange, la cure et le nettoyage du matériel. L'extraction de l'eau des rivières, des aquifères et d'autres sources pour la production de béton peut aggraver les problèmes de pénurie d'eau, notamment dans les régions souffrant de sécheresse ou de demandes concurrentes en eau.

#### **j) Génération de déchets**

La construction en béton génère des déchets substantiels sous forme de béton excédentaire, d'emballages et de débris de démolition. Une élimination incorrecte des déchets de béton peut contribuer à la congestion des décharges et à la pollution environnementale, soulignant la

nécessité de pratiques durables de gestion des déchets, telles que le recyclage et la réutilisation.

### **k) Effet d'îlot de chaleur urbain**

L'utilisation extensive du béton dans les zones urbaines peut aggraver l'effet d'îlot de chaleur urbain, où le béton absorbe et retient la chaleur, entraînant des températures élevées par rapport aux paysages naturels environnants. Ce phénomène peut aggraver les risques pour la santé liés à la chaleur, la consommation d'énergie et la pollution de l'air dans les environnements urbains.

Malgré ces défis environnementaux, des efforts sont en cours pour atténuer l'impact du béton de masse sur l'environnement grâce à des pratiques durables et des innovations technologiques. Celles-ci comprennent la réduction de la teneur en clinker de ciment grâce à des liants alternatifs, l'optimisation des mélanges de béton pour réduire les émissions de carbone, la mise en œuvre de matériaux recyclés et de sous-produits industriels dans la production de béton, la promotion de programmes de certification de bâtiments écologiques et l'amélioration des pratiques de construction pour minimiser l'empreinte environnementale et favoriser la restauration écologique. En priorisant la gestion environnementale et en adoptant des approches durables, l'industrie de la construction peut atténuer l'impact environnemental du béton de masse tout en répondant à la demande croissante en infrastructure dans un monde aux ressources limitées.

## **1.14 Conclusion**

De la mise en place dans des conditions hivernales difficiles à la chaleur extrême, le béton de masse pose de nombreux défis techniques uniques qui nécessitent de suivre des normes de conception et de surveillance spécifiques.

Malgré ces inconvénients, les avantages du béton de masse, notamment sa résistance, sa durabilité, ses propriétés thermiques et sa polyvalence, en font un choix privilégié pour de nombreux projets de construction à grande échelle où la stabilité, la longévité et les performances sont primordiales. La gestion efficace des défis associés à la construction en béton de masse est essentielle pour garantir le succès des projets.

## **CHAPITRE 2**

### **Bétons des chaussées**

# Bétons des chaussées

---

## Sommaire

---

2.1. Introduction.....	16
2..2 Les chaussées .....	17
2.2.1 Définition de la chaussée.....	17
2.2.2 Constitution d'une structure de chaussée.....	17
2.2.3. Les différents types de structure de chaussées .....	18
2.2.4. Différence entre chaussée en bitume et chaussée en béton .....	20
2.2.5. Spécificités des chaussées en béton .....	20
2.2.6. Les différentes structures types en béton .....	21
2.3. Le béton compacté au rouleau en technique routière .....	23
2.3.1. Définition .....	23
2.3.2. Histoire .....	24
2.3.3. Les composants du BCR routier .....	24
2.3.4. Méthodes de formulation .....	26
2.3.5. Propriétés du BCR.....	27
2.3.6. Fabrication du BCR.....	27
2.3.7. Transport .....	28
2.3.8. Mise en oeuvre.....	29
2.3.9. Contrôle de qualité dans l'exécution des chaussées en BCR.....	31
2.3.10. La cure du BCR .....	31
2.3.11. Drainage.....	32
2.3.12. Avantages du BCR en corps de chaussée .....	33
2.3.13. Inconvénients du BCR.....	33
2.4. Conclusion.....	34

## 2.1. Introduction

L'introduction du Béton compacté au rouleau BCR en technique routière a révolutionné le domaine de construction des infrastructures, en offrant une alternative efficace et rentable pour la réalisation de structures solides et résistantes, tout en réduisant les délais de construction et les coûts d'entretien à long terme.

Ce chapitre vous présentera en premier lieu les chaussées et leurs caractéristiques essentielles. En second lieu, il plongera dans les tenants et les aboutissants de la technique du béton compacté au rouleau, mettant en lumière ses constituants, ses propriétés, les méthodes utilisées pour sa formulation, ses applications, ses avantages et ses considérations importantes dans le domaine de la construction moderne des chaussées rigides.

## **2..2 Les chaussées**

### **2.2.1 Définition de la chaussée**

La chaussée est une structure « plane » conçue et dimensionnée pour assurer son rôle sur une période de service minimale fixée au stade de l'élaboration du projet, avec un entretien courant. Conçue aussi pour durer bien au-delà de cette durée minimale, avec un entretien plus important et, au stade ultime de sa vie, des opérations de restauration ou de reconstruction.

### **2.2.2 Constitution d'une structure de chaussée**

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support.

**Le sol support** est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée. Pendant la phase de travaux, la couche de forme a pour rôle d'assurer une qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour la réalisation du corps de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, la couche de forme permet d'augmenter la capacité portante de la plate-forme support de chaussée.

**Les couches d'assise** sont généralement constituées d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

**La couche de surface** est formée d'une couche de roulement surmontant éventuellement une couche de liaison intermédiaire. La couche de roulement assure la fonction d'étanchéité des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau et des sels de déverglaçage, et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers.

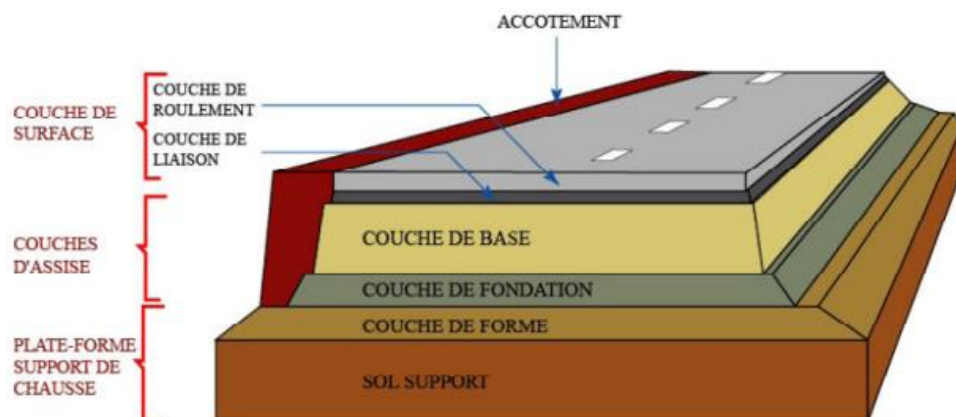


Figure 2-1 : Désignation des couches de chaussées.

### 2.2.3. Les différents types de structure de chaussées

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les différents types de structures suivants :

- Chaussées souples;
- Chaussées semi-rigides;
- Chaussées rigides.

#### a) Chaussées souples

C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent sont traitées aux liants hydrocarbonés.

L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

La couche de fondation et/ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée.

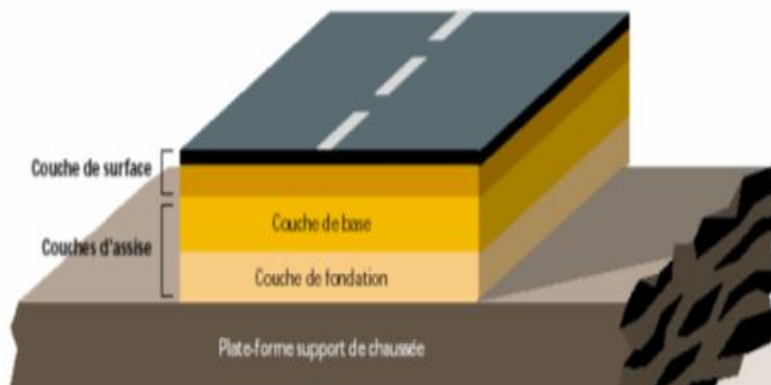


Figure 2-2 : Chaussée souple

### b) Chaussées semi-rigides

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation).

L'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50cm.

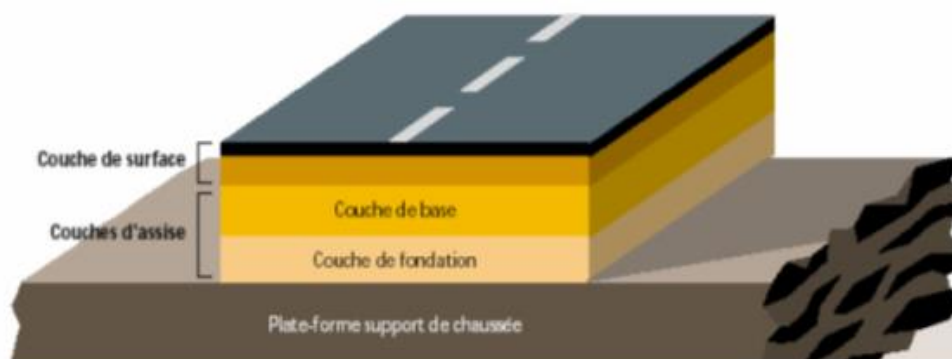


Figure 2-3 : Chaussées semi-rigides

### c) Chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydraulique ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints.

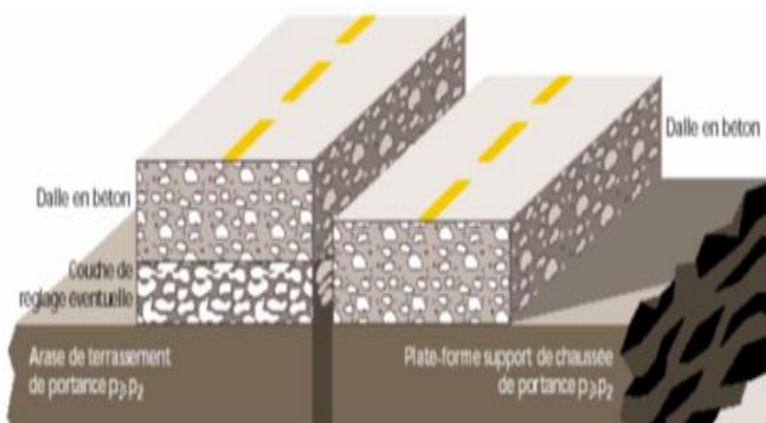
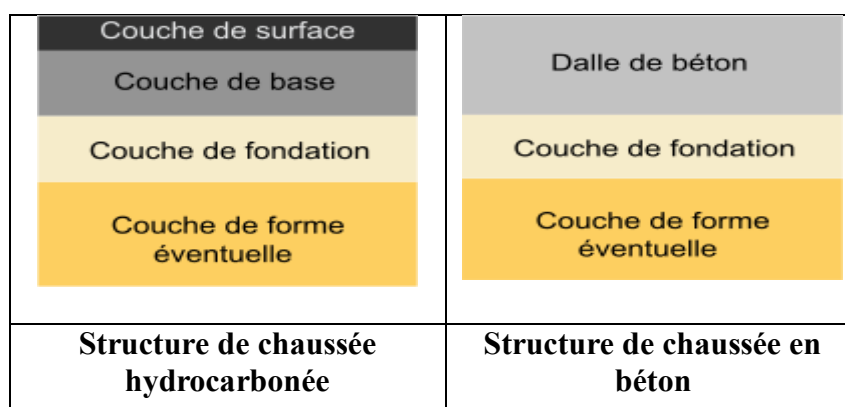


Figure 2-4 : Chaussées rigides

### 2.2.4. Différence entre chaussée en bitume et chaussée en béton

Les différences entre une chaussée en béton et une chaussée en bitume sont multiples et peuvent influencer le choix du matériau en fonction des besoins spécifiques d'un projet routier. Voici quelques distinctions clés :



- La rigidité structurelle du premier est plus forte comparativement à celle de la seconde.
- La façon où le revêtement répartit la charge sur la couche de forme. Grâce à ces bonnes rigidités et raideur, le béton tend à étaler la charge sur une grande surface de la couche de forme. Par contre, le revêtement en BB se compose de matériaux plus souples et moins raides, il ne répartit pas la charge de la même façon qu'un revêtement rigide. Pour atteindre les objectifs de répartition, il faut ainsi plus de couches de revêtement ou plus d'épaisseurs, pour former une hauteur propre à assurer un étalement optimal de la charge sur le sol support.
- La durée utile prévue de la chaussée souple en bitume est de 17 ans, alors que celle de la chaussée rigide en béton est de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau considéré.

Bien que les deux types de chaussées aient leurs avantages et leurs inconvénients, le choix entre une chaussée en béton et une chaussée en bitume dépendra des exigences spécifiques du projet, y compris la durabilité souhaitée, les contraintes budgétaires et les conditions environnementales.

### 2.2.5. Spécificités des chaussées en béton

#### a) Le fonctionnement mécanique

Sous l'action d'une charge, une couche de béton induit les phénomènes suivants :

- Répartition uniforme de la charge sur le sol support. Donc, contraintes de compression sur le sol relativement faibles
- Apparition de deux types de contraintes au sein de la couche béton :
  - Une contrainte de compression en partie supérieure ;
  - Une contrainte de traction en partie inférieure.

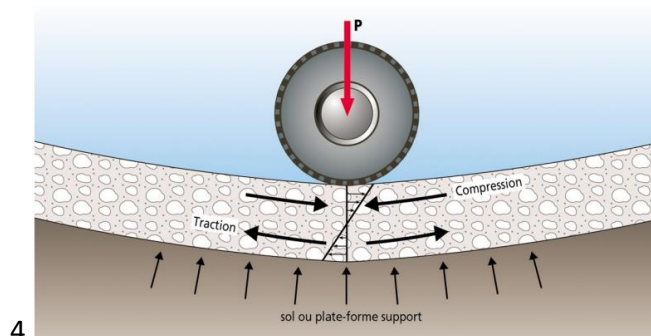


Figure 2-5 : Schéma de fonctionnement mécanique des chaussées en béton

### b) Le principe de dimensionnement

Le dimensionnement du béton consiste essentiellement à déterminer l'épaisseur nécessaire lui permettant de subir le passage répété des charges sans se fissurer. Il convient donc :

- De déterminer la contrainte à la traction du béton et s'assurer qu'elle est inférieure à la contrainte admissible du matériau
- D'apprécier le comportement à la fatigue du béton (fonction du type de structure)

#### 2.2.6. Les différentes structures types en béton

La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Ci-dessous nous présentons les structures de chaussée en béton de ciment :

- Les chaussées à dalles courtes non armées et non goujonnées « BC » ;
- Les chaussées à dalles courtes non armées et goujonnées « BCg » ;
- Les chaussées à dalle armées et joints goujonnés ;
- Les chaussées en béton armé continu « BAC » ;
- Les chaussées composites.

---

**a) Chaussées à dalle non armées et non goujonnées**  
**« chaussées non articulées et non renforcées »**

Pour ce type de chaussée, la fissuration spontanée est réduite par la réalisation des joints. Ces joints peuvent être soit moulés dans le béton, soit sciés dans le béton jeune. On distingue les joints longitudinaux de construction et de retrait puis les joints transversaux de construction et de retrait.

Bien que les joints permettent de réduire significativement les problèmes de fissuration, ils constituent néanmoins des points faibles pour ce type de chaussée.

**b) Chaussées à dalle non armées, à joints goujonnées**  
**« chaussées articulées et non renforcées »**

L'implantation des goujons au droit de chaque joint permet l'amélioration du comportement des joints transversaux et du transfert de charge entre dalles. Les goujons sont constitués par des barres d'acier lisse, mises en place dans le béton soit par insertion avec vibration dans le béton frais, soit posés à l'avance sur des berceaux. Ce type de chaussée présente une très bonne durabilité.

**c) Chaussées à dalle armées et joints goujonnées**  
**« chaussées articulées et renforcées »**

Les armatures de la dalle permettent de reprendre les efforts de traction dus aux passages des véhicules.

**d) Chaussées en béton armé continu**  
**« chaussées continues et renforcées »**

L'introduction des armatures continues au niveau de la dalle de béton permet la suppression des joints qui constituent des points faibles. Les aciers permettent de reprendre les efforts de traction dus aux moments fléchissant.

**e) Chaussées composites**

Une chaussée composite est une structure constituée de deux couches :

- Un revêtement en Béton Armé Continu BAC ou en dalles béton non armées et à joints goujonnés BC5g,
- Une couche de fondation en Grave-Bitume GB3. Elle est posée sur une plate-forme

support de bonne qualité dont la portance est supérieure ou égale à :

- PF3 ( $120 < EV2 \leq 200$  MPa) pour une structure BAC/GB3,
- PF2qs ( $80 < EV2 \leq 120$  MPa) pour une structure BC5g/GB3.

### 2.3. Le béton compacté au rouleau en technique routière (pavages)

Le béton compacté au rouleau est de plus en plus utilisé pour tous les types de chaussée qui demandent résistance et robustesse. La raison en est simple : le béton compacté au rouleau allie la performance du béton conventionnel à la simplicité de l'asphalte. Sa valeur est d'autant plus grande que sa longévité est supérieure et qu'il coûte moins cher que le béton conventionnel. Si l'on considère qu'il requiert peu d'entretien, le choix du BCR s'impose dans de multiples applications.

#### 2.3.1. Définition

Le béton compacté au rouleau (BCR) est un matériau défini comme étant un mélange, raide à l'affaissement nul, composé de granulats, de ciment, et d'eau et d'adjuvants (éventuellement avec ajouts cimentaires), il est compacté en place en utilisant un matériel spécifique comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou un matériel couramment utilisé en travaux public tel que les rouleaux compacteurs.



Figure Figure 2-6 : béton compacté au rouleau

### 2.3.2. Histoire

L'histoire du BCR remonte aux années 1930. À cette époque, les ingénieurs cherchaient des moyens d'améliorer la résistance et la durabilité des revêtements en béton pour les routes et les pistes d'aéroport. L'une des premières utilisations documentées du BCR remonte à l'aéroport de Cleveland, aux États-Unis, en 1937.

Le béton compacté au rouleau a été pendant de nombreuses années utilisé comme sous couche pour le revêtement des routes et des pistes d'aviation. Cette technique a été mise en œuvre avec succès sur un certain nombre de barrage dans le monde, dont la plupart, à ce jour, sont situés au Japon et aux États-Unis.

La première construction d'un revêtement en BCR en Amérique a été réalisée en 1942 par l'US Army corps of Engineers. C'est au Royaume-Uni, durant les années quarante que le BCR a été utilisé comme couche de base d'épaisseur n'excédant pas les 20 cm. Le premier barrage construit en béton compacté au rouleau est celui des Alpes Gera en Italie entre 1961-1964.

Les premiers exemples modernes de revêtement en BCR connus furent construits en Espagne vers 1970, sur des voies à faible trafic. Pour leurs applications sous trafics lourds, une aire d'entreposage de billes de bois d'une surface de 52 000 m<sup>2</sup> a été construite sur l'île de Vancouver en Colombie-Britannique (Canada). Après 1980, au moins dix autres pays (la France, les États-Unis, la Norvège, la Suède, la Finlande, le Danemark, l'Allemagne, l'Australie, l'Argentine et le Japon) ont construit chacun plus de 100 000 m<sup>2</sup> de revêtement en BCR, alors que sept autres (le Chili, l'Uruguay, le Mexique, la Colombie, l'Équateur, l'Islande et l'Afrique du Sud) ont employé le BCR pour des chaussées expérimentales.

À la fin de 1990, leur surface totale excédait 12 millions de mètres carrés. La moitié à peu près ont été construits en Espagne. Environ 1 500 000 m<sup>2</sup> ont été employés sur autoroutes et routes principales, avec une couche de revêtement en enrobé sur le BCR pour améliorer l'uni. Les 10 500 000 m<sup>2</sup> restants ont été appliqués sur des routes à faible vitesse, par exemple des routes secondaires ou des zones industrielles et militaires. Dans la plupart de ces derniers cas, le BCR n'était pas revêtu.

### 2.3.3. Les composants du BCR routier

Le BCR contient les mêmes constituants de base que ceux employés pour le béton courant tel que ciment, granulats (sable et gravier), additions, adjuvant et eau.

### **a) Liant**

Les propriétés nécessaires des liants hydrauliques utilisés pour le BCR sont principalement:

- Une faible chaleur d'hydratation.
- Une prise retardée ou un temps de prise long.
- Le pourcentage de C3A doit être limité pour garantir une bonne durabilité et éviter la dégradation.
- Une bonne résistance aux sulfates car l'eau peut contenir des agents agressifs.

### **b) Granulats**

Pour limiter les problèmes de ségrégation et en vue d'une meilleure qualité de surface. La dimension maximale du granulats D doit être inférieure à 20 mm pour les ouvrages routiers. Le fuseau granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions (exemple: 0/3-3/8-8 /15-15/20).

### **c) Additions**

Pour obtenir une bonne cohésion et maniabilité du BCR à l'état frais et une bonne compacité et durabilité à l'état durci, une quantité d'éléments fins est nécessaire. Il existe quatre additions utilisables pour le BCR : Les additions calcaires, les cendres volantes, les laitiers vitrifiés moulu de haut fourneau et les fumées de silices.

### **d) Eau**

Pour les mélanges de béton compacté au rouleau. La quantité d'eau requise dépend de l'optimum de compacité. Afin de déterminer la quantité d'eau à ajouter au mélange, on réalise des essais Proctor modifié. La plage de variation de la teneur en eau, qui est le pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs, est comprise entre 4,5% et 6%.

### **e) Adjuvant**

Le dosage des adjuvants nécessaire à la fabrication des BCR est largement supérieur à celui du béton conventionnel afin d'améliorer ces performances.

Les types d'adjuvant utilisés sont :

- Les retardateurs de prise, les réducteurs d'eau et les agents entraîneur d'air (AEA).
- Les réducteurs d'eau permettent d'obtenir un mélange plus homogène et facilitent les opérations de mise en place.

- Les retardateurs de prise permettent de prévenir les risques de prise prématurée et la formation de joints froids.
- Les agents entraîneur d'air permettent la formation de petites bulles d'air dans les bétons réduisant ainsi les problèmes de détérioration par le gel.

Le tableau (2-1) présente un mélange typique de béton compacté au rouleau pour la construction des routes.

**Tableau 2-1** : Caractéristiques de deux bétons compactés au rouleau.

Caractéristiques du béton	Routes
Liant (Kg/m <sup>3</sup> )	250-350
Adjuvant (%quantité totale de liant)	0-20
Rapport eau/ciment	0,3-0,4
Taille maximale des granulats (mm)	20

#### 2.3.4. Méthodes de formulation

La plupart des méthodes de formulation des mélanges généralement utilisées pour le béton conventionnel ne sont pas directement applicables au BCR.

Des méthodes de formulation de mélanges de BCR sont, pour la plupart, basées sur des approches empiriques ou semi-empiriques qui requièrent la réalisation d'un grand nombre de gâchées d'essais afin d'obtenir le mélange aux proportions optimales.

On peut citer:

- Méthode basée sur la limitation de maniabilité ;
- Méthode basée sur les concepts du compactage du sol ;
- Méthode basée sur l'économie;
- Méthode basée sur l'empilement granulaire (MEC) de Larrard et Sedran (1999-2000).

Par ailleurs, ces dernières années, une méthode de formulation a été développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) pour être par la suite adaptée par le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval à la formulation de mélanges de BCR. Cette méthode repose sur une meilleure compréhension des paramètres affectant les propriétés à l'état frais et durci du BCR. Dans la grande majorité des cas, une seule gâchée d'essai est requise pour déterminer les caractéristiques du mélange optimum.

### 2.3.5. Propriétés du BCR

- Le BCR, comme il a été mentionné plus haut, est un béton sec avec un affaissement quasi nul :
- Bonne résistance à la compression: pour supporter les charges concentrées lourdes,
- Bonne résistance à la flexion: pour supporter les lourdes charges répétées sans affaissement et répartir uniformément les charges sur la couche de fondation.
- Bonne résistance au cisaillement: pour résoudre le problème d'orniérage.
- Haute densité et faible absorption: donnant lieu à une bonne durabilité,
- Le BCR est particulièrement sensible à la ségrégation en raison du faible volume de pâte et conséquemment, du faible volume d'eau de gâchage. Afin d'éviter la ségrégation, de rendre le malaxage plus facile et d'améliorer l'uni, la dimension maximale des granulats est limitée à 20/22mm et parfois moins.
- Le retrait de séchage des BCR est habituellement inférieur au béton plastique. Le retrait de séchage ultime d'un mélange de BCR typique est généralement compris entre 400 et 500  $\mu\text{m}/\text{m}$ , tandis que pour un mélange de béton plastique, le retrait de séchage ultime peut être de 700  $\mu\text{m}/\text{m}$  et plus.
- Si les « vides de compactage » sont bien distribués (l'espacement exact requis est fonction de l'homogénéité, de la porosité et de la perméabilité de la pâte), non connectés et suffisamment petits, le BCR sera durable au gel-dégel.

### 2.3.6. Fabrication du BCR

Le BCR est produit en centrale fixe ou par une centrale mobile. Le choix du type de centrale de production dépend des caractéristiques du projet, c'est-à-dire de la proximité et de la disponibilité des unités de production, de la quantité de béton à mettre en place et du budget à investir.

Deux types de centrales existent :

- les centrales fixes ;
- les centrales mobiles.

Le malaxage du BCR nécessite une énergie suffisante pour assurer une dispersion efficace de la faible quantité d'eau de gâchage et du ciment dans le mélange. Le système de malaxage doit permettre de produire un mélange homogène et uniforme.



Figure 2-7: Photographie d'une centrale mobile

### 2.3.7. Transport



Figure 2-8: Transport des mélanges de BCR.

Après le malaxage, le béton est acheminé au site de construction par des camions, au préférable

à benne basculante. Certaines précautions sont prises lors du transport afin d'empêcher la ségrégation. Pour éviter tout risque de prise, le temps de transport ne doit pas excéder une heure. Les camions doivent être équipés d'une toile de recouvrement afin de protéger le béton des températures extérieures et d'éviter toute perte d'humidité.

### **2.3.8. Mise en oeuvre**

Un plan de mise en œuvre du BCR doit être réalisé avant le début des travaux de construction d'un revêtement. Ce plan doit définir la séquence de mise en place du béton (direction des équipements de mise en place, longueur et largeur des bandes), l'emplacement des joints de construction, l'emplacement de la centrale mobile. Ce plan de pose permet d'assurer une mise en place continue, de respecter les délais de mise en œuvre et de minimiser les joints froids.

#### **a) Préparation de l'infrastructure et de la fondation granulaire**

La capacité de support de l'infrastructure et de la fondation doit être suffisante pour permettre le compactage adéquat de toute la couche de BCR mise en place. Il est important d'assurer le drainage de l'infrastructure et de la fondation granulaire. La fondation granulaire doit être compactée afin d'obtenir 95 % et plus de la masse volumique optimale de l'essai Proctor modifié. Le BCR est très sensible à l'humidité de la surface de la fondation granulaire. La partie inférieure du revêtement en BCR est la zone la plus sollicitée par les charges, c'est-à-dire que les contraintes de flexion y sont les plus élevées. Un apport d'eau provenant de la fondation dans cette partie critique du revêtement augmentera localement le rapport eau/liant et diminuera ainsi la résistance mécanique du BCR. Les zones d'humidité excessives doivent donc être excavées et remplacées par du nouveau matériau granulaire.

#### **b) Mise en place**

Le BCR est mis en place à l'aide d'un finisseur conventionnel à enrobé bitumineux ou d'un finisseur à haut pouvoir de compactage. Les finisseurs doivent être équipés de barres de compactage afin de pré-compacter le BCR mis en place. Les barres de compactage du finisseur doivent être en mesure de consolider le BCR à au moins 80 % de la masse volumique humide de référence sur toute la largeur de la table du finisseur.

L'expérience en chantier a montré que, généralement, la différence d'épaisseur entre la couche de BCR à la sortie du finisseur et la couche de BCR compactée par un rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses est de l'ordre de 10 à 25 %, selon le type de finisseur.



Figure 2-9: Mise en place du BCR

### c) Compactage du BCR

Le compactage est l'étape la plus importante du procédé car il permet d'obtenir la densité et la résistance du revêtement, ainsi que son égalité et sa texture superficielle.

Le compactage consiste en deux passes (on entend par une passe, un cycle complet en avant et en arrière) du compacteur à rouleau sans vibration pour consolider les matériaux, suivis de quelques passes avec vibration, généralement 4 ou plus, jusqu'à l'obtention de la compacité spécifiée. Le processus de compactage est complété par quelques passes de l'engin à pneus pour fermer les éventuels vides ou les petites fissures superficielles. A défaut d'un compacteur à pneus, on peut donner quelques passes finales du compacteur à rouleau sans vibration pour fermer la surface.



Figure 2-10: Equipement du compactage du BCR.

Le compactage des bords est aussi une question délicate. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les épauler avec des matériaux stables placés à l'avance, comme par exemple les bordures en zone urbaine; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produisent. Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale.

### 2.3.9. Contrôle de qualité dans l'exécution des chaussées en BCR

Le processus de contrôle de la qualité exige un bon contrôle du compactage sur chantier. En effet un compactage insuffisant ( $< 97\%$ ) influe négativement sur les caractéristiques du BCR durci. Le contrôle de la compacité in situ est réalisé généralement par un Nucléo-densimètre appelé aussi appareil Troxler .



Figure 2-11: Contrôle du compactage

### 2.3.10. La cure du BCR

Pour minimiser les retraits de séchage pendant la mise en place, il est important de maintenir l'humidité superficielle des surfaces exposées afin de ralentir le phénomène de séchage par les procédés suivants:

- Retardateur d'évaporation ;
- Vaporisation d'eau en brume;
- Application d'un produit de cure pigmenté blanc juste après le compactage final du BCR.



Figure 2-12 : Cure du béton

### 2.3.11. Drainage

Dans la conception routière classique, quelle que soit la structure et quels que soient les matériaux qui la constituent, l'eau a toujours été considérée comme le pire ennemi de la route. Elle est un élément décisif d'accélération des dégradations des structures de chaussées. Ceci est aussi vrai pour les revêtements en béton mais à moindre échelle.

La présence de l'eau dans les chaussées rigides est due à :

- L'infiltration par les joints et par les abords de la chaussée,
- La remontée des eaux de la plate forme (déblais, nappes affleurantes, points singuliers, etc.),
- La concentration des eaux sous le revêtement en période de dégel (eau remontant par succion en période de gel).

Pour éviter les accumulations d'eau sous le revêtement en béton et les accotements, ainsi que ses effets néfastes, des dispositions constructives – maintenant classiques – sont adoptées.

- La collecte et l'évacuation des eaux superficielles
- Afin d'assurer la sécurité et le confort des usagers (aquaplanage, projections d'eau), il faut évacuer rapidement l'eau de la surface de la chaussée. Un profil en travers adapté, avec dévers d'au moins 2 %, canaliser l'eau soit au milieu de la chaussée, soit latéralement. L'eau sera ensuite évacuée de façon classique par des caniveaux et des avaloirs judicieusement placés.

### 2.3.12. Avantages du BCR en corps de chaussée

- Faible teneur en eau: permettant d'augmenter les résistances mécaniques et de réduire le retrait .
- Ne nécessite pas d'armature de résistance, ni goujons, ni tirants: permettant des économies de temps pour la mise en place et réduisant ainsi le coût de construction.
- Ne nécessite ni coffrages ni travaux de finition: permet d'accélérer la mise en œuvre et réduit le coût et la main-d'œuvre .
- Technologie peu complexe comparée au dallage en béton armé.
- Surface claire et rigide: La clarté de la surface permet des économies d'énergies d'éclairage et la rigidité permet une résistance à l'abrasion,
- Les procédés de confection et de transport avec des usines en continu ou des convoyeurs et les techniques de mise en place permettent d'enregistrer des économies sur le coût global de la construction
- Moins de travaux d'entretien: les routes en BB nécessitent des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans. Par contre, on ne commence à faire des travaux d'entretien pour les routes rigides qu'après 12 à 15 ans.
- Peu de déformation: La rigidité du BCR empêche la formation de déformations d'autre part, le BCR ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur.
- Une bonne adhérence: Les études ont démontré que le BCR permet en général une bonne adhérence qui réduit la distance d'arrêt pour être plus courte comparée à celle du BB, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.
- Des économies de carburant: La chaussée souple augmente, jusqu'à 20 %, la consommation de carburant puisqu'elle fléchit plus que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à déduire qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple.

### 2.3.13. Inconvénients du BCR

La qualité de l'uni de surface des revêtements en BCR représente le majeur inconvénient de cette technique. Puisqu'il assure le confort au roulage sur un revêtement en BCR, l'uni a

présenté un problème permanent limitant les applications du BCR sur des routes à fortes vitesses. En plus, Malgré l'effort puissant de compactage, la texture de la surface d'un revêtement en BCR est relativement ouverte comparée à celle du Béton bitumineux .



Figure 2-13: surface d'une chaussée en béton

## 2.4. Conclusion

Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) est un béton à faible teneur en eau et composé d'un mélange de ciment, d'agrégats inertes et d'eau de gâchage (avec éventuellement des ajouts cimentaires). L'affaissement de ce mélange est nul. Il est produit en centrale fixe ou mobile comme un mélange raide et ferme, transporté par le camion à benne basculante. Il est épandu au moyen de matériel pour revêtement bitumineux à haute densité comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage, et compacté en utilisant le matériel courant en travaux publics (tel que les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les bulldozers, plaques vibrantes...). Pour un mélange de BCR, le compactage est l'élément clé de son comportement.

## **CHAPITRE 3**

### **Bétons prêts à l'emploi**

# Bétons Prêt à l'emploi

---

## Sommaire

---

3.1 Introduction .....	35
3.2. Définition .....	36
3.3. Histoire .....	36
3.4. Composition du bpe .....	36
3.5. Les propriétés du béton prêt à l'emploi .....	39
3.6. Fabrication industrielle du bpe .....	39
3.6.1 Unité de production.....	39
3.6.2 Processus de fabrication .....	40
3.7. Transport .....	41
3.8 la mise en place du bpe sur le chantier .....	43
3.8.1. Le coulage.....	43
3.8.2. Le serrage du béton (ou vibration) .....	44
3.8.3. Les traitements de surface et la cure .....	44
3.9 influence des conditions climatiques.....	45
3.9.1. Précautions à prendre pour les bétonnages par temps chaud.....	45
3.9.1. Précautions à prendre pour les bétonnages par temps froid.....	46
3.10. Désignation des bétons: bpe .....	46
3.10.1. Les bétons à propriétés spécifiées (bps) .....	47
3.10.2. Les bétons à composition prescrite (bcp) et bétons à composition prescrite dans une norme (bcpn) .....	48
3.11. Les différents types de béton prêt à l'emploi .....	48
3.12. Avantages du béton prêt à l'emploi .....	50
3.13. Inconvénients du béton prêt à l'emploi .....	50
3.14. Domaine d'application .....	51
3.15. Conclusion.....	52

### 3.1 Introduction

Aujourd'hui, le béton prêt à l'emploi est devenu un élément essentiel de l'industrie de la construction, offrant une solution pratique, efficace et polyvalente pour de nombreux types de

projets. Ce qui différencie un béton prêt à l'emploi (BPE) d'un béton préparé manuellement se trouve au niveau de la technique de préparation.

La base normative pour tous les bétons de structure est la norme NF EN 206/CN qui concerne la spécification, la production, la livraison et le contrôle de la conformité des bétons.

### 3.2. Définition

Le terme « béton prêt à l'emploi », dit BPE, est utilisé pour désigner le béton « frais », c'est à dire mélangé dans une centrale à béton. Il est ensuite transporté par des camions toupie, appelés aussi malaxeurs, jusqu'au chantier sur lequel il sera mis en œuvre. Il ne doit pas être confondu avec le béton tout prêt conditionné en sac (béton sec conditionné en sac à mélanger avec de l'eau).



Figure 3-1: Béton prêt à l'emploi

### 3.3. Histoire

La fabrication du béton de manière industrielle est relativement récente. Il a tout d'abord fait son apparition aux Etats-Unis avant de s'imposer timidement en France dans les années 30. Aujourd'hui, c'est tous les ans environ 15 milliards de tonnes de béton qui sont produites chaque année. En France, cet essor ne prendra cependant de l'ampleur qu'après les années 60.

### 3.4. Composition du BPE

Comme le béton traditionnel, le béton prêt à l'emploi est un mélange de ciment, de sables, de gravillons, d'additions, d'eau et d'adjudants.

### **a) Ciment**

Le ciment représente le constituant phare dans la composition d'un béton ; sa nature, ses caractéristiques et son dosage vont définir directement sa destination et son application. Entre contrainte de durabilité et destinations spécifiques, les ciments utilisés dans les formulations du BPE se divisent en trois catégories :

- CEM I : ciment à base majoritaire de clinker
- CEM II : ciment à base de clinker avec des additions comme les cendres volantes ou les fillers calcaires
- CEM III : ciment à base de laitier de haut fourneau

### **b) Eau**

L'eau va permettre l'hydratation du grain de ciment libérant ainsi ses caractéristiques intrinsèques, elle est l'élément qui va faire réagir le ciment afin de déclencher sa prise de durcissement. Dans la mise en œuvre d'un béton, elle va orienter la consistance vers la partie d'ouvrage impliquée. Son dosage sera en lien direct avec la qualité du béton.

### **c) Granulats**

Les granulats sont les composants majeurs d'une composition béton. Ils vont accorder au béton une compacité optimale, une meilleure maniabilité, et une mise en œuvre perfectionnée.

Les granulats recyclés, issus directement de l'économie circulaire, répondent aux enjeux économiques et environnementaux et sont principalement utilisés pour la réalisation de chantiers routiers.

Il existe différentes coupures de granulats :

- Sables : 0/2 ; 0/4
- Gravillons : 2/8 ; 4/8
- Gravier : 8/16 ; 16/22 ; 16/32

(La liste est non exhaustive - en fonction de la demande et de la technicité des ouvrages à réaliser.)

### **d) Les adjuvants**

Les adjuvants offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du béton.

- Accélérateur de prise : diminue le temps de prise du béton.
- Accélérateur de durcissement : accélère le temps de durcissement du béton.
- Retardateur de prise : ralentit le temps de prise du béton.
- Plastifiant réducteur d'eau : diminue la quantité d'eau dans le béton afin d'augmenter les résistances et la maniabilité.
- Superplastifiant : diminue fortement la quantité d'eau dans le béton afin d'augmenter les résistances et la maniabilité, permet la production de bétons spéciaux type BHP, BAN, BAP et améliorer la résistance au gel et au sel de déverglaçage
- Entraîneur d'air : permet d'incorporer des micro bulles d'air réparties de manière homogène, apporte au béton une durabilité accrue en résistant au sel et au gel et améliorer l'imperméabilité du béton
- Hydrofuge : contribue à l'imperméabilité du béton en obstruant les pores.

### **e) Additions**

Les additions dans les bétons prêt à l'emploi sont des fillers calcaires, issus de minéraux broyés. Elles améliorent les propriétés physiques des ciments. Les caractéristiques des fillers offrent à la composition béton une meilleure maniabilité, des résistances optimisées, un impact environnemental maîtrisé et ouvrent la porte sur les bétons techniques et architectoniques.

### **f) Les ajouts**

Elles peuvent être de différente nature:

- les colorants : permettent d'apporter de la couleur dans la masse ou en surface.
- les colloïdes : permettent au béton de ne pas se délayer au contact de l'eau.
- les fibres, de nature synthétique, métallique, structurelle : permettent d'améliorer la tenue du béton : elles se substituent entièrement ou en partie aux treillis soudés.

La composition détaillée du béton prêt à l'emploi (BPE) peut varier en fonction des spécifications du projet et des normes de l'industrie. Les proportions des différentes composantes sont réglées selon l'usage qui veut être fait de ce béton. Il est néanmoins utile de connaître quelques recommandations générales :

- Ciment : 300 à 400 kg/m<sup>3</sup>

- Granulats (sables et graviers) : 1600 à 1900 kg/m<sup>3</sup>
- Eau : varie en fonction du type de ciment et des adjuvants
- Adjuvants : selon les besoins du projet (fluidité, temps de prise, etc.)

### 3.5. Les propriétés du béton prêt à l'emploi

Le Béton prêt à l'emploi possède toutes les caractéristiques du béton standard.

### 3.6. Fabrication industrielle du BPE

#### 3.6.1 Unité de production

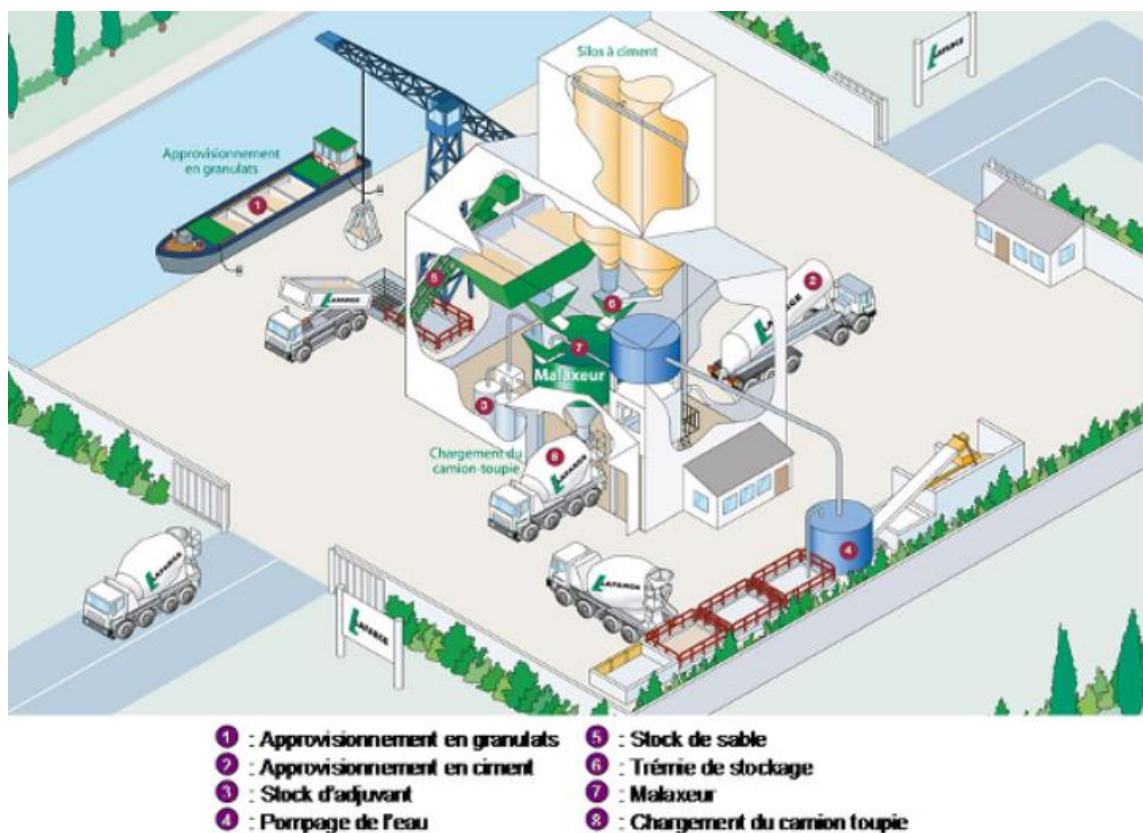


Figure 3-2: Unité de fabrication du béton prêt à l'emploi

Une unité de production de béton prêt à l'emploi est composée de silos contenant le ciment, de cases pour les sables et les graviers, de cuves de stockage des différents adjuvants et d'un malaxeur pour le mélange des composants qui sont soigneusement pesés et contrôlés. Chaque volume malaxé correspond à une gâchée (quantité de béton frais obtenue en une seule opération de malaxage) qui est transportée puis déversée dans le camion-toupie (appelé également camion-malaxeur) qui assure la livraison sur chantier.

### 3.6.2 Processus de fabrication

Le processus de fabrication du béton prêt à l'emploi (BPE) comprend plusieurs étapes, depuis la préparation des matières premières jusqu'à la livraison du BPE sur le chantier de construction. Voici les détails de chaque étape :

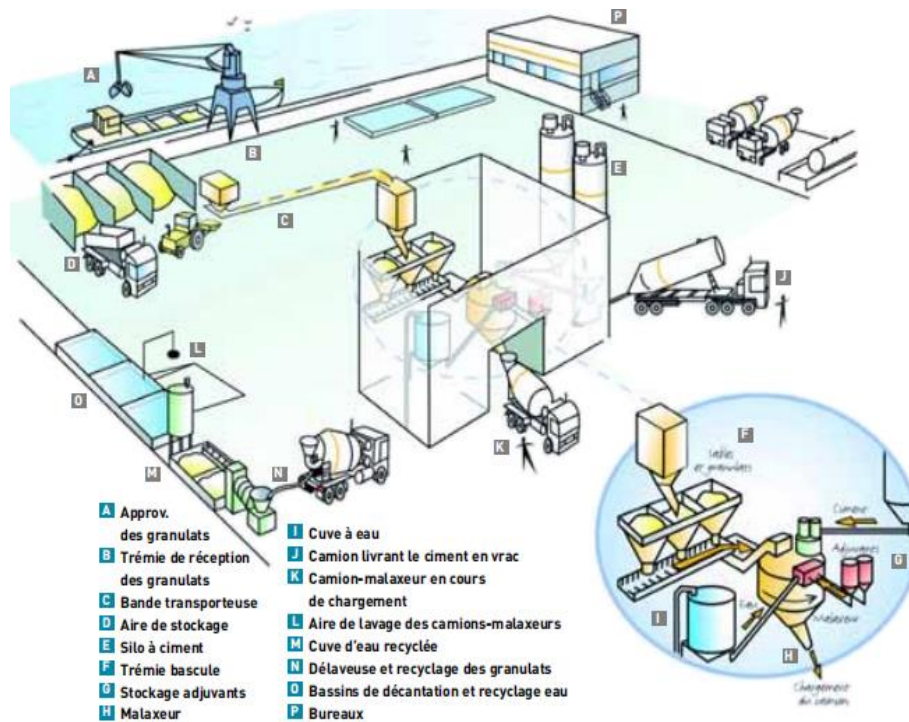


Figure 3-3: Processus de fabrication du béton prêt à l'emploi

#### a) La réception et le stockage

Une centrale utilise généralement deux ou trois types de ciments stockés dans des silos de grande capacité. Les granulats (sables et gravillons) sont stockés par catégorie pour éviter tout mélange. Les adjuvants sont stockés en cuves pour un dosage précis.

#### b) Le dosage

C'est un poste clé, conçu pour une fabrication automatique à partir de compositions programmées du béton. Le dosage pondéral des granulats et du ciment atteint une précision de l'ordre de 2 à 3 %. Après détermination de la teneur en eau des granulats et des matières en suspension dans le cas d'utilisation d'eau de recyclage grâce à des sondes électroniques, le dosage de l'eau d'appoint est effectué de manière également pondérale.

### c) Le malaxage

Le malaxage des constituants dans des malaxeurs à poste fixe est une garantie de régularité des bétons.

Les malaxeurs sont généralement à axe vertical, ce qui assure un brassage efficace des constituants; la gâchée est déversée directement dans les camions de livraison.

### d) Le poste de commande

Les centrales sont commandées depuis un poste qui est le cerveau de la fabrication, de façon:

- **soit automatique** (cas le plus général aujourd'hui): l'opérateur sélectionne la composition programmée dans la mémoire de l'ordinateur et inscrit le volume à fabriquer; les dosages et le malaxage se font alors automatiquement;
- **soit semi-automatique**: le dosage des constituants est affiché par l'opérateur; le cycle de fabrication se déroule alors automatiquement.

### e) Le laboratoire

Le laboratoire permet d'effectuer les essais sur les matières premières et sur les bétons à l'état frais ou durci. C'est la garantie du suivi des fabrications pour l'utilisateur; les résultats des contrôles usuels peuvent être fournis aux clients. En outre, des contrôles supplémentaires, ou des essais pour une étude préalable de béton, peuvent être effectués à la demande.





Le schéma ci-dessous récapitule les principales étapes de fonctionnement de la centrale à béton.

## 3.7. Transport

La quantité de BPE nécessaire au chantier arrive par camion. Avant la livraison de BPE, il faut toujours vérifier que le camion pourra arriver jusqu'au chantier : chemin d'accès pouvant supporter le poids du camion plein, portail suffisamment large. Et en cas d'utilisation d'un camion pompe, attention aux lignes électriques aériennes que la flèche pourrait toucher.

Pour des chantiers d'une certaine importance, d'accès difficile, un camion pompe permet de livrer le béton à des distances dépassant 150 m, et sur des hauteurs de 100 m et plus, pour les pompes les plus puissantes.

Les principaux types de camions sont :

Type de camion	Volume	Distance de chargement	Caractéristiques	Pour quel usage ?	Images
Camion toupie	de 4 à 10 m <sup>3</sup>	De 0 à 3 m à l'aide de la goulotte de déchargement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Largeur : 2,5 m</li> <li>• Longueur : 10 m</li> <li>• Hauteur : 4 m</li> <li>• PTAC : de 26 à 32 T</li> </ul>	Pour un chantier facile d'accès	 <p>Camion toupie - © Simon Bernard</p>
Camion tapis	de 4 à 7 m <sup>3</sup>	Horizontalement de 10 à 16m Amplitude : jusqu'à 8m de haut	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Largeur : 2,5 m</li> <li>• Longueur : 10 m</li> <li>• Hauteur : 4 m</li> <li>• PTAC : de 26 à 32 T</li> </ul>	Pour des zones où l'accès est difficile	 <p>Camion tapis - © Rkris, Fotolia</p>
Camion pompe	Absence de cuve à béton	Horizontalement : de 12 à 48 m Verticalement : de 16 à 52 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vérins de stabilisation de 4 à 8 m</li> <li>• Largeur : 2,5 m</li> <li>• Longueur : 10 m</li> <li>• Hauteur : 4 m</li> <li>• PTAC : de 26 à 32 T</li> </ul>	Pour des chantiers où l'accès est impossible par des moyens habituels	 <p>Camion pompe - © lamax, Fotolia</p>
Camion malaxeur (mixo-pompe ou pumi)	de 4 à 6 m <sup>3</sup>	Horizontalement : de 12 à 20 m Verticalement : de 16 à 24 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Largeur : 2,5 m</li> <li>• Longueur : 10 m</li> <li>• Hauteur : 4 m</li> <li>• PTAC : de 26 à 32 T</li> </ul>	Pour des chantiers à l'accès difficile	 <p>Camion malaxeur - © Simon Bernard</p>

Il est impératif de respecter quelques principes élémentaires au cours des opérations de livraison du béton sur le chantier afin de ne pas modifier les caractéristiques du béton.

- Les ajouts d'eau sont interdits pendant le transport et au déchargement. De même, à part le superplastifiant, généralement ajouté juste avant déchargement, les autres adjuvants ne doivent pas être incorporés en fin de transport.
- Eviter les chocs ou manœuvres brutales qui peuvent entraîner la séparation des constituants du béton : phénomène de ségrégation dû aux densités différentes des constituants.
- Le béton doit être protégé contre les risques d'évaporation, de délavage ou de ségrégation.
- Le délai de transport ne doit pas dépasser 1h30 (sauf traitement spécial), délai ramené à 45 minutes par temps, chaud, où le risque de chute de maniabilité est accru. L'emploi de retardateurs de prise ou de plastifiants permet généralement de s'opposer à ce type de difficultés.
- Le matériel utilisé pour le transport doit être fréquemment nettoyé pour éviter tout risque de pollution (déchets végétaux ou organiques, restes de béton...).

## 3.8 La mise en place du BPE sur le chantier

### 3.8.1. Le coulage

Le déchargement du béton sur le chantier se fait par une goulotte, après inversion du sens de rotation de la bétonnière. Des tubes emboîtés permettent de prolonger le rayon d'action de la goulotte jusqu'à 4 à 5 m en contrebas. Au-delà, des tapis transporteurs équipent souvent les camions et permettent de décharger le béton jusqu'à 10 m du camion et sur des hauteurs de 5 à 6 m. Dès que le béton prêt à l'emploi est déversé dans le coffrage prévu à cet effet, il faut le travailler à l'aide d'une pelle et le répartir sur toute la surface, sans trop attendre.



Figure 3-3: mise en place du BPE

Les coffrages doivent :

- Être suffisamment rigides et stables pour supporter la poussée du béton tout particulièrement dans le cas des bétons fluides, sans se déformer y compris pendant la phase de serrage (vibration) ;
- Être étanches pour éviter les fuites de laitance aux joints ;
- Avoir un parement nettoyé et traité avec un agent de démoulage approprié et appliqué en couche régulière. Cette préparation est indispensable pour obtenir un béton d'apparence uniforme, et pour éviter des phénomènes d'adhérence entraînant des arrachements lors du décoffrage ;
- Être exempts de corps étrangers (clous, ligatures, boulons, etc.) et d'eau stagnante.
- Le béton doit être déversé d'une hauteur inférieure à 0,8 mètre et être réparti régulièrement.

Une fois que c'est fait, il vous faudra le talocher et le lisser. Le décoffrage se fera dans les 24 heures après la pose, une fois qu'il vous sera possible de marcher sur le béton coulé.

### **3.8.2. Le serrage du béton (ou vibration)**

Le serrage est indispensable pour obtenir des bétons solides et durables (sauf dans le cas de bétons autoplaçants). On utilise généralement pour le serrage des aiguilles vibrantes électriques, pneumatiques ou thermiques, de 25 à 150 mm de diamètre, en fonction du volume du béton à vibrer. Les règles suivantes doivent être respectées :

- Immerger l'aiguille verticalement ou sous un angle faible ;
- Remonter l'aiguille lentement (10 à 15 secondes) sur une hauteur n'excédant pas 60 cm ;
- Choisir des points de vibration successifs avec un écartement en fonction du diamètre de l'aiguille ;
- Ne pas vibrer trop près du coffrage et ne pas toucher les armatures avec l'aiguille.

### **3.8.3. Les traitements de surface et la cure**

Après compactage, différentes méthodes de traitement de surface peuvent être appliquées sur les dallages pour les rendre antidérapants, faciles à nettoyer et esthétiques (Béton lissé à la règle, taloché, balayé, brossé, désactivé,...) :

Le traitement à effectuer est en fonction de la destination de l'ouvrage à réaliser.

La cure du béton est la protection apportée pour éviter sa dessiccation (perte d'eau par évaporation) pendant les premières journées. La dessiccation entraîne une déshydratation du mortier de surface et un retrait rapide ayant pour conséquence des fissurations.

Elle est réalisée :

Pour les dallages, après la fin du surfaçage, soit par la pulvérisation d'un produit de cure, soit par la mise en place d'un film de polyéthylène translucide ou d'un géotextile régulièrement humidifié ;

Pour les murs en élévation, après décoffrage, par la pulvérisation d'un produit de cure ou par la mise en place d'un géotextile régulièrement humidifié.

### **3.9 Influence des conditions climatiques**

#### **3.9.1. Précautions à prendre pour les bétonnages par temps chaud**

Les bétons mis en œuvre par temps chaud risquent de souffrir si certaines précautions ne sont pas prises. En effet, une dessiccation trop rapide du béton entraîne des fissures de retrait qui peuvent nuire à la pérennité de l'ouvrage. De façon générale :

- Il faut éviter de mettre en place un béton avec des températures extérieures supérieures à +30°C ;
- Utiliser un ciment à chaleur d'hydratation modérée (préférer un CEM II/B 42.5 à un CEM I 52.5, par exemple) ;
- Utiliser les adjuvants de type retardateur de prise;
- Diminuer le dosage de ciment tout en gardant un rapport E/C constant;
- Rendre le support non absorbant (pose d'un film plastique ou humidification du support)
- Mise en oeuvre la plus rapide possible (éviter de faire attendre les camions toupies) ;
- Prévoir les bétonnages très tôt le matin afin de profiter des températures plus fraîches et des constituants rafraîchis;
- Compacter énergiquement;
- Refroidir les coffrages par arrosage à l'eau fraîche;
- Si possible, augmenter le nombre des joints de retrait (par sciage ou autres joints prévus à cet effet) ;
- Armer correctement les parties d'ouvrage;
- Après bétonnage, pulvériser un produit de cure (produit anti-évaporant).

### 3.9.1. Précautions à prendre pour les bétonnages par temps froid

De manière générale :

- Il faut éviter de mettre en place un béton avec des températures extérieures inférieures à 0°C. A partir de -5°C les bétonnages sont strictement interdits;
- Utiliser un ciment à forte chaleur d'hydratation modérée (préférer un CEM I 52.5 ou CEM I 42.5R à un CEM II/B 42.5 par exemple) ;
- Utiliser un béton avec une classe de résistance plus élevée (béton à dosage élevé de type C30/37 ou C35/45 voire C40/50 à la place du C25/30 habituel) ;
- Utiliser les adjuvants de type réducteurs d'eau ou fluidifiants afin de réduire le facteur Eau/Ciment;
- Utiliser un accélérateur de prise ;
- Mettre en place un béton ayant une température supérieure à +15°C (béton chaud si possible) ;
- Ne pas rajouter d'eau sur chantier (plus le rajout d'eau est important, plus la vitesse de prise du béton est rallongée)
- Prévoir une mise en œuvre rapide (éviter de faire attendre les camions toupies) ;
- Prévoir les bétonnages en matinée afin de bénéficier de l'inertie et de l'exothermie du béton.
- Si possible, utiliser des coffrages en bois (éviter les coffrages métalliques) ;
- Protéger la surface du béton à l'aide de bâches de protection ou de plaques de polystyrène;
- Utiliser des bâches chauffantes, si possible;
- Vérifier la maturité du béton avant tout décoffrage;
- Eviter tout décoffrage prématuré.

### 3.10. Désignation des bétons: BPE

Il existe trois types de produits dans la norme NF EN 206-1:

- Béton à propriétés spécifiées (BPS) ;
- Béton à composition prescrite (BCP) ;
- Béton à composition prescrite dans une norme (BCPN).

### 3.10.1. Les bétons à propriétés spécifiées (BPS)

Ces bétons sont les produits courants commercialisés par les centrales à béton. Les propriétés requises et les caractéristiques du béton souhaité sont spécifiées par le prescripteur (l'utilisateur du béton) au producteur (la centrale à béton) ; ce dernier est alors responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences.

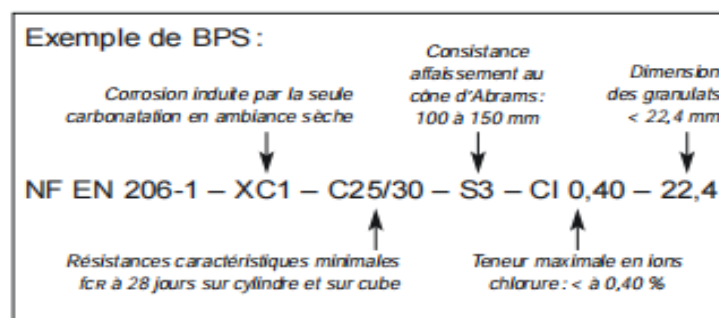
La majeure partie des Bétons Prêts à l'Emploi produits sont des BPS.

La désignation des BPS suit sur la norme béton NF EN 206.

Les spécifications de base pour commander un BPS sont :

- Sa classe de résistance (C 25/30, C30/37...) : les deux nombres correspondent à la résistance à la compression (exprimées en méga Pascal) d'éprouvettes cylindriques et cubiques.
- La classe d'exposition (XC, XF, XA...) : la classe d'exposition correspond au type d'environnement dans lequel le béton va être mis en œuvre. Ce code peut être suivi d'un chiffre indiquant de degré de sévérité de la classe.
- La taille des granulats en mm (D10, D22...) ;
- La classe de consistance (S1, S2, S3, S4, S5). Elle renseigne sur le niveau de fluidité du béton frais. Un béton S1 est très ferme tandis qu'un béton S5 est très fluide (béton autoplaçant).
- La classe de chlorure (Cl) : renseigne sur la teneur maximale en ions chlorure en fonction de la quantité de ciment.

Voici un exemple de désignation d'un BPS :



### 3.10.2. Les bétons à composition prescrite (BCP) et bétons à composition prescrite dans une norme (BCPN)

Il s'agit de bétons pour lesquels la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur par le prescripteur.

Les BCP sont des bétons fabriqués essentiellement par les entreprises de BTP sur les chantiers :

- Soit après essais initiaux pour les chantiers importants de bâtiment ou travaux publics réalisés avec une centrale à béton de chantier (BCP) ;
- Soit avec des dosages en ciment fixés (exemple : 350 kg/m<sup>3</sup> pour du béton armé) pour les petites quantités de béton réalisées sur chantier à la bétonnière.

### 3.11. Les différents types de béton prêt à l'emploi

Il faut savoir que le béton prêt à l'emploi peut se décliner en différentes gammes, en plus du béton classique, dont voici un aperçu de leurs caractéristiques :

Nature du béton prêt à l'emploi	Caractéristiques
<b>béton fluide</b>	Appartenant à la classe S4 sur l'échelle de la consistance du béton, le béton fluide se situe entre le béton classique et l'auto plaçant. Pouvant s'appliquer aussi bien à l'horizontal qu'à la verticale, sa mise en place est facilitée, notamment l'étape de tirage de la matière. De plus, il est tout particulièrement apprécié car il offre un remplissage optimal du coffrage au sein duquel il est coulé, permettant ainsi de s'adapter à tout type de structure, même les plus complexes.
<b>béton fibré</b>	Un béton fibré est composé de fibres métalliques ou bien synthétiques permettant de renforcer la résistance du béton et donc limiter l'apparition de fissures.
<b>béton auto plaçant / auto nivelant</b>	De catégorie S5 sur l'échelle de la consistance du béton, il est alors plus liquide que le béton fluide. Parfaitement homogène, sa fluidité hors pair lui permet alors de remplir les coffrages et d'envelopper les armatures qui y sont présentes. En plus de son extrême fluidité qui facilite sa mise en place, ce béton n'a nul besoin de vibration pour prendre place, chose qu'il est en mesure de faire par lui-même. Il offre alors une surface parfaitement plane.

<b>béton hydrofuge</b>	Il s'agit en réalité d'un béton classique auquel a été ajouté, au moment de la préparation, un adjuvant permettant de renforcer la résistance aux infiltrations d'eau et donc, d'éviter à la construction de devenir poreuse. Il est principalement appliqué lorsque la situation nécessite une parfaite étanchéité comme ce peut être le cas d'une dalle extérieure, d'un plancher, d'un sous sol ou encore d'un réservoir bétonné sous terre...
<b>Béton retardé</b>	Ces bétons permettent des cadences de bétonnage faibles ou scindées en phases.
<b>Béton coloré</b>	Ces bétons, colorés dans la masse par des pigments minéraux permettent de réaliser des bétons d'aménagements particulièrement esthétiques.
<b>béton décoratif</b>	Le béton décoratif, à l'inverse du béton classique a pour vocation à la fois de servir de support mais aussi de revêtement. Ainsi, il permet de donner un aspect esthétique aux sols ou aux murs, et ce, aussi bien en intérieur qu'en extérieur. Il existe de nombreuses sortes de béton décoratif qui sont personnalisables, quasiment à l'infini. Ainsi, il est possible de créer des terrasses, des plages de piscine, une salle de bains, etc. tout en offrant une imitation parquet en bois par exemple ou encore pierre, pavés de rue...
<b>Les bétons routiers</b>	Le développement des chaussées béton et de leurs équipements (séparateurs, bordures et caniveaux coulés en place) a conduit à étudier des formulations de béton appropriées. Les exigences de ces bétons (consistance, résistance mécanique, résistance au gel et aux sels de déverglaçage) ont amené les producteurs de BPE et les entrepreneurs de chaussées en béton à signer un protocole d'accord précisant notamment les engagements réciproques pour les spécifications des bétons. Les bétons routiers sont utilisés dans la réalisation des voies à grande circulation, ainsi que de nombreuses voiries à faible trafic (voiries urbaines, de lotissement, forestières ou agricoles).

### **3.12. Avantages du béton prêt à l'emploi**

Parmi les avantages apportés par la fabrication du béton en centrale BPE, il faut souligner :

#### **a) Avantages techniques**

En fonction des exigences du chantier, le BPE peut mettre au point et livrer les bétons les mieux adaptés, dont les caractéristiques font l'objet d'un suivi grâce à des contrôles de laboratoire. Ces contrôles permettent aussi d'assurer la conformité des constituants. L'automatisation très poussée des centrales et la précision des dosages et les contrôles de production contribuent à la régularité et à la qualité des produits livrés.

#### **b) Avantages sociaux**

Le BPE évite les manutentions pénibles nécessaires au chargement des bétonnières sur les chantiers.

#### **c) Avantages économiques**

Le BPE évite l'immobilisation de stocks sur le chantier. Par la ponctualité des livraisons et grâce aux délais courts, la productivité des chantiers se trouve améliorée.

#### **d) Simplification de l'organisation du chantier**

Les manutentions de constituants sont supprimées, les variations de cadences de bétonnage sont mieux absorbées grâce à la souplesse des livraisons du béton. L'emprise des chantiers est réduite.

#### **e) Services**

La livraison est faite par camions adaptés, pour des quantités correspondant strictement aux besoins. Des pompes ou des camions équipés de tapis permettent de faciliter la mise en place du béton.

### **3.13. Inconvénients du béton prêt à l'emploi**

- L'investissement initial est très élevé.
- Ne convient pas aux petits projets de construction qui nécessitent une faible quantité de béton.

- Il faut un système de transport efficace de la centrale à béton au chantier.
- les ouvriers doivent être prêts sur le site pour couler le béton en position sans aucun retard afin d'éviter la perte d'affaissement.
- Le béton prêt à l'emploi a un temps limité et doit être utilisé dans les 210 minutes qui suivent la mise en place de la centrale. Les embouteillages ou une panne du véhicule peuvent créer des problèmes majeurs.

### **3.14. Domaine d'application**

Le béton prêt à l'emploi est un matériau qui est très sollicité dans les travaux de BTP, et son utilisation répandue permet de faire :

#### **a) Dans le secteur routier**

Le béton coloré occupe une place fondamentale pour la délimitation des espaces de circulation. Cette coloration est obtenue en général par l'utilisation de pigments ou de résines colorées. On peut aussi utiliser la coloration de certains granulats pour modifier la couleur du béton mais la teinte obtenue est en générale moins vive.

Le béton coloré n'est pas simplement un béton décoratif. Les chaussées colorées sont dorénavant réalisées pour des raisons de sécurité. En différenciant les chaussées, on attire l'œil et le conducteur va inconsciemment avoir tendance à être plus vigilant aux risques qui l'entourent.

#### **b) Dans les tunnels**

les bétons polymères permettent, de par leur couleur claire, d'augmenter la luminosité et donc de réduire les dépenses sur le long terme en électricité. En plus d'allier confort visuel avec aspect environnementaux, ces bétons, confectionnés par un mélange de granulats de quartz, sont relativement résistants et supportent donc très bien le trafic des véhicules lourds. De plus, il y a très peu de risques que la chaussée se déforme avec ce type de béton.

#### **c) Pour la réalisation de dalles**

En général, pour tout ce qui concerne la réalisation de dalle ou de semelle, on utilise du béton armé. Son emploi est soumis à des normes assez strictes. Mais petit à petit, l'apparition d'un béton fibré beaucoup moins difficile à mettre en œuvre fait son apparition. Ce béton peut être

composé au choix de 3 types de fibres : des fibres métalliques (acier, inox ou fonte), des fibres organiques (polyamide, carbone, etc...) ou bien de fibre minérales (verre, mica, etc...). Chaque type de fibre sera adapté à un usage particulier. Avec les fibres minérales, il sera par exemple possible de réaliser des éléments beaucoup plus fins. Bien que la mise en œuvre de ce béton soit bien plus simple et rapide, il ne faut pas oublier que le prix de ce béton est plus élevé que celui du béton armé.

### **3.15. Conclusion**

Le BPE est un produit frais qui doit être mis en œuvre rapidement: sa mise en place dans l'ouvrage ne doit pas excéder deux heures. Les unités de production de béton sont donc situées à proximité des lieux de consommation. Leur rayon d'action est généralement compris entre 20 et 30 km. Les camions peuvent être munis d'équipements spécifiques de livraison comme un tapis orientable, une pompe avec bras à déploiement hydraulique. Pour certaines conditions d'accessibilité, le recours à une pompe à béton sur véhicule autonome permet des coulages rapides sur des distances et hauteurs importantes.

Le contrôle de la qualité du béton prêt à l'emploi est très important car il doit être mélangé avec une dose appropriée d'adjuvants et transporté vers différents sites.

Tous les ingrédients du béton sont testés de manière approfondie avant la production du béton afin de garantir une meilleure qualité.

Tout est pris en charge par les centrales à béton pendant la fabrication du mélange de béton afin de produire des structures durables, durables et de première qualité.

**CHAPITRE 4**  
**Bétons réfractaires**

# Bétons réfractaires

---

## Sommaire

---

4.1. Introduction .....	53
4.2. Définition .....	53
4.3. Histoire .....	54
4.4. Composition .....	56
4.5 Formulation .....	577
4.6. Transformation du liant hydraulique avec la température .....	57
4.7. Propriétés essentielles .....	58
4.8. Catégories des bétons réfractaires .....	59
4.8.1. Les bétons réfractaires denses .....	60
4.8.2. Les bétons réfractaires isolants .....	60
4.9. Fabrication du béton réfractaire .....	60
4.9.1. Préparation du béton réfractaire .....	61
4.9.2. Mise en œuvre du béton réfractaire .....	61
4.10. Transport du béton réfractaire .....	63
4.11. Contrôle .....	64
4.12. Avantages du béton réfractaire .....	65
4.13. Inconvénients du béton réfractaire .....	65
4.14. Domaine d'application .....	65
4.15. Conclusion .....	66

### 4.1. Introduction

Au niveau étymologique le terme réfractaire vient du latin refractarius, refriger, qui veut dire briser, résister, refuser de se soumettre, en particulier un matériau réfractaire est un matériau

qui "refuse de se soumettre" à haute température. À un niveau plus scientifique, un matériau réfractaire est une substance ou mélange de substances qui a une température de fusion supérieure à 1500°C, ou encore une matière autre que les métaux et les alliages, dont la résistance pyroscopique est équivalente à 1500°C au minimum, ce qui en d'autres termes veut dire que le matériau ne doit ni se ramollir, ni s'affaisser sous son propre poids avant d'atteindre 1500°C.

## 4.2. Définition

Les bétons réfractaires sont des matériaux utilisés dans les applications où des températures élevées sont présentes, généralement supérieures à celles auxquelles les bétons ordinaires peuvent résister. Ces températures élevées peuvent être rencontrées dans des environnements tels que les fours industriels, les cheminées, les incinérateurs, les hauts-fourneaux, les chaudières, etc.



Figure 4-1: Béton réfractaire

## 4.3. Histoire

L'histoire des bétons réfractaires remonte à l'Antiquité, où des matériaux réfractaires primitifs étaient utilisés pour construire des fours à haute température. Cependant, le développement et l'utilisation généralisée des bétons réfractaires modernes ont principalement eu lieu au cours des derniers siècles.

Au 19<sup>em</sup> siècle, avec l'essor de l'industrialisation, la demande de matériaux capables de résister à des températures élevées dans les processus industriels a augmenté. Cela a conduit à des avancées dans la formulation des bétons réfractaires. Des recherches ont été menées pour développer des mélanges de matériaux qui pourraient résister à des températures encore plus élevées tout en conservant leur intégrité structurelle.

Le premier béton réfractaire a été produit et utilisé par Henri Saint-Claire Deville, en France, peu avant 1856 [26]. Il a calciné des mélanges d'alumine et de chaux, jusqu'à obtenir du clinker alumineux, puis il a mélangé le produit de réaction (clinker après moulure) avec des granulats de corindon et de l'eau pour préparer des creusets résistants aux hautes températures. En 1924, « la Division de la U.S. Steel Corporation Ciment Atlas Universal » a commencé à fabriquer un ciment alumineux pour une utilisation comme liant dans les mélanges réfractaires. En 1929, les bétons réfractaires à base de ciments alumineux ont déjà été fabriqués industriellement aux Etats-Unis, tandis que la production au Japon n'a commencé qu'en 1939. Pendant les premiers temps les principaux agrégats, utilisés dans les bétons réfractaires, étaient la chamotte et les briques réfractaires broyées. Les bétons réfractaires étaient alors fabriqués et mis en oeuvre de manière classique. Souvent le mélange était fait à la main dans une cuve de mortier, ainsi que la coulée et la vibration lors de l'installation. Dans les années cinquante, à la suite des expériences faites avec des matières premières pures, Alcoa et Lafarge ont commencé la commercialisation de ciments alumineux de haute pureté, développé spécifiquement pour l'industrie des réfractaires. Ils résultent dans une large gamme de produits à partir de mélanges de ciments hautement alumineux, de l'alumine pure, du calcaire, et contenant de petites quantités de silice et d'oxyde de fer. Au fil du temps, les progrès dans les technologies de fabrication et les matériaux ont permis de développer des bétons réfractaires de plus en plus performants et adaptés à une gamme encore plus large d'applications industrielles. En 1960, les bétons à base de ciments alumineux de haute pureté et d'agrégats d'alumine tabulaire, étaient très utilisés, présentant des avantages dans les domaines, de la réfractarité, la résistance à l'abrasion et à la corrosion. À la fin des années 1970, les bétons à basse teneur en ciment ont été élaborés sur la base du brevet de Prost en 1969. Plus tard, les bétons à ultra basse teneur en ciment, ont été développés. Ces bétons ont une micro-structure uniforme à faible porosité et une résistance élevée sur toute la plage de faibles et moyennes températures, et un niveau de chaux très bas qui améliore la résistance à haute température et la résistance à la corrosion. Durant les deux dernières décennies, une nouvelle famille de bétons réfractaires a été développée dans le milieu des années quatre vingts, bétons sans ciment, ou béton auto coulable. Ce sont des bétons à basse et ultra basse teneur en ciment avec une consistance après mélange qui leur permet une bonne circulation et entrainement d'air sans apport d'énergie extérieure.

## 4.4. Composition

Les bétons réfractaires sont composés par une combinaison d'agrégats réfractaires, une matrice, agent liant, et des adjuvants. Les proportions de chaque élément utilisé varient à chaque composition de béton pour avoir les propriétés physiques et chimiques désirées convenables selon l'application.

### a) Ciment

La nature des liants destinés aux hautes températures est très diverse. Ils peuvent être des ciments réfractaires, des liants à base d'argile, des liants à base de silicate, des résines spéciales, etc... Le dosage doit être de 400 kg/m<sup>3</sup> de ciment et le rapport eau/ciment de 0,40 au maximum.

### b) Granulat

Les agrégats réfractaires couramment utilisés comprennent la bauxite, le corindon, le carbure de silicium, la magnésie, l'alumine, la chromite, etc. Ils doivent posséder une répartition granulométrique spécifique permettant une mise en forme et une densification optimale du produit. La proportion des fines constitue un facteur de conception très important. En effet, les matières fines affectent considérablement les caractéristiques de mise en forme, la densité et les propriétés du matériau.

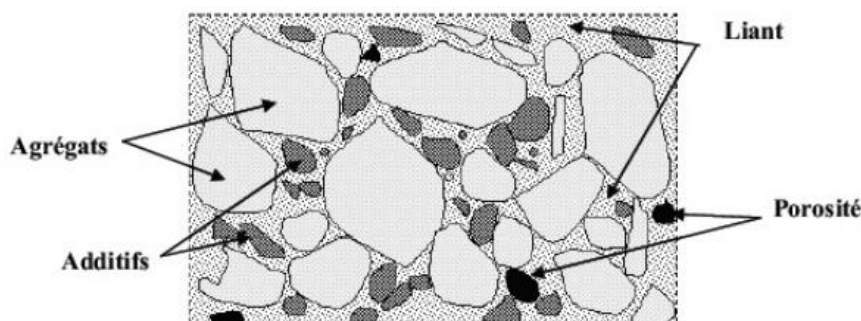


Figure 4-2 : Schéma de la microstructure d'un réfractaire

### c) Des additifs

Pour améliorer certaines propriétés du béton réfractaire, telles que la plasticité, la résistance au choc thermique, la résistance à l'usure, la résistance chimique, etc, des additifs peuvent être inclus. Des plastifiants, des agents de renforcement, des fibres réfractaires, des agents anti-fissuration, des stabilisateurs, etc... peuvent être ajoutés au mélange.

Le béton réfractaire ne doit pas être armé. Dans certains cas, on peut utiliser des fibres métalliques ou des fers d'ancrage dans les parties les plus froides de l'ouvrage. Pour cela, utiliser de préférence de l'acier réfractaire.

#### **4.5 Formulation**

Plusieurs méthodes basées sur des modèles d'empilement granulaire ont été proposées pour obtenir des matériaux à forte compacité. Les modèles proposés par Furnas (1920) et Andreasen (1931) permettent d'obtenir une compacité maximale d'un mélange de poudres.

L'étape de la formulation du mélange commence par l'optimisation du squelette granulaire. Celle-ci concerne :

- Les granulats, choisis sur la base de critères de résistance aux sollicitations thermomécanique et chimique.
- La répartition granulométrique, conditionne la capacité du béton et le développement des liaisons entre agrégats et matrice.

La pâte de ciment, comblant les vides inter granulaires, est ensuite l'objet d'une optimisation couplée avec le granulat :

- La nature du ciment est choisie sur la base de critères environnementaux (température, caractère chimiquement agressif du milieu), neutronique (eau fixée) et mécanique (classe de résistance) ;
- Le dosage du ciment est conditionné par le diamètre maximal des particules et la répartition granulométrique des granulats, et, pour partie, par la classe de résistance du béton ;
- Le dosage en eau détermine alors, travers la valeur du rapport massique eau/ciment (E/C), la classe de résistance et, pour partie, la consistance du béton. La quantité d'eau joue un rôle primordial sur la qualité finale du béton, les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton ;
- Le dosage en adjuvant intervient enfin pour régler la consistance du béton frais et sa maniabilité.

#### **4.6. Transformation du liant hydraulique avec la température**

Après sa mise en œuvre, le béton prend et durcit. Au cours des premières heures, il passe d'un état visqueux à un état solide au fur et à mesure que des liaisons se créent dans le liant lors de

l'hydratation des anhydres. Les réactions chimiques se poursuivent dans le temps et permettent d'accroître la rigidité et la résistance du liant et par conséquent celle du béton.

Lorsque le béton réfractaire est soumis à un traitement thermique, les hydrates du liant se transforment d'abord en hydrates stables puis en anhydres par perte de l'eau chimiquement liée. Les transformations physico-chimiques du liant modifient profondément le comportement du béton, elles dépendent de la nature et des proportions des différents constituants. Chaque transformation physico-chimique produit une évolution de la microstructure de la phase liante et influence le comportement thermomécanique du matériau à l'échelle macroscopique.

#### **4.7. Propriétés essentielles**

Les propriétés des bétons réfractaires dépendent de leur composition spécifique et de leur formulation, mais elles comprennent généralement les caractéristiques suivantes :

##### **a) La résistance à la chaleur**

Les bétons réfractaires sont conçus pour résister à des températures extrêmement élevées, souvent jusqu'à plusieurs milliers de degrés Celsius, sans ne se déformer ni se désintégrer.

##### **b) Le facteur isolant**

Certains bétons réfractaires sont formulés pour avoir des propriétés d'isolation thermique, ce qui signifie qu'ils peuvent aider à maintenir des températures élevées à l'intérieur d'une structure ou à empêcher la pénétration de la chaleur à l'extérieur.

##### **c) La résistance à la corrosion**

Ils doivent être résistants à l'action des produits chimiques présents dans l'environnement de travail, tels que les acides, les bases, les gaz corrosifs, etc.

##### **d) La résistance à la fissuration**

Les bétons réfractaires doivent être capables de résister aux chocs thermiques, c'est-à-dire aux changements rapides de température, sans ne se fissurer ni se briser.

##### **e) La résistance aux impacts mécaniques (chocs, tension, traction, etc.)**

Les bétons réfractaires doivent avoir une résistance mécanique adéquate pour supporter des charges et des contraintes mécaniques à des températures élevées.

### f) La résistance à l'abrasion

Ils doivent également être capables de résister à l'abrasion, c'est-à-dire à l'usure causée par des particules en mouvement à haute vitesse.

### g) La stabilité dimensionnelle

Les bétons réfractaires doivent maintenir leur forme et leurs dimensions initiales à des températures élevées, sans ne se déformer ni se dilater de manière excessive.

### h) Durabilité

Ils doivent être durables et résister à l'usure et à la dégradation au fil du temps, même dans des environnements extrêmement hostiles.

## 4.8. Catégories des bétons réfractaires

En fonction des exigences spécifiques de l'application, les bétons réfractaires peuvent être formulés pour optimiser ces différentes propriétés, offrant ainsi une solution adaptée à une large gamme d'environnements industriels à haute température. Il existe de nombreuses façons de classer les bétons réfractaires.

On distingue deux grandes familles de bétons réfractaires telles que les bétons réfractaires denses et les bétons réfractaires isolants (Figure 4-3)

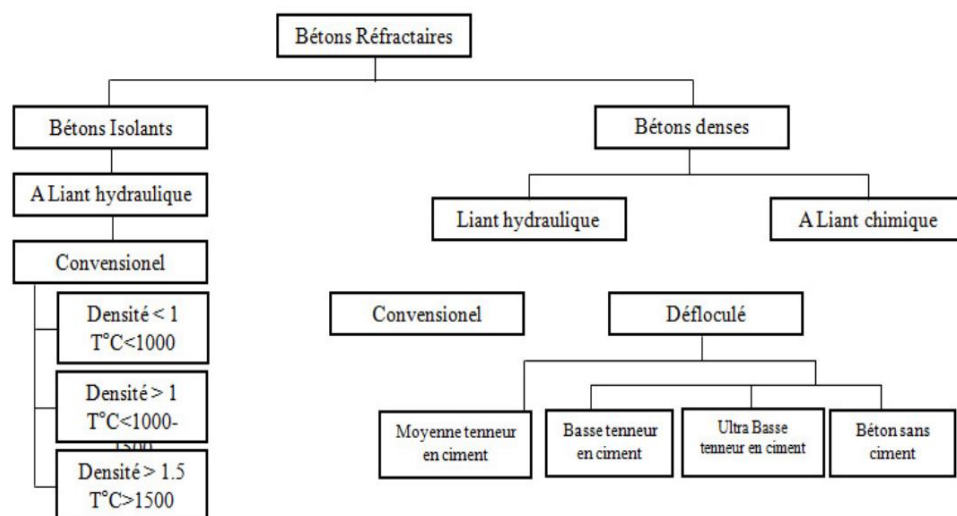


Figure 4-3 - Classification des bétons réfractaires

#### **4.8.1. Les bétons réfractaires denses**

Ils sont denses quand leur densité est égale ou supérieure à  $1750 \text{ Kg/m}^3$ . Ces bétons réfractaires s'utilisent dans les fourneaux, les blocs de brûleur, les fours à moufle et les chaudronneries. Exemples : four de fusion, four à forge, four de cimenterie.

La résistance à l'abrasion, au choc thermique et à l'agressivité thermique des scories est déterminée par le choix des matériaux. La conductivité thermique étant liée à la densité, les bétons réfractaires denses sont conducteurs et donc très peu isolants.

#### **4.8.2. Les bétons réfractaires isolants**

Ces bétons ont des densités, après cuisson, de  $1500 \text{ Kg/m}^3$  ou moins. Ils sont prioritairement utilisés pour la construction d'enceintes ou de fours ne présentant pas de risques mécaniques majeurs. Ils s'utilisent aussi sur les surfaces exposées aux températures élevées ainsi que comme couche supplémentaire de revêtement derrière les briques et les bétons réfractaires de haute densité. Leur rôle est de limiter les déperditions thermiques. Exemples : four de traitement thermique, de céramique.

Les bétons réfractaires isolants sont couramment utilisés pour la réalisation de pièces de forme moulée.

### **4.9. Fabrication du béton réfractaire**

La fabrication du béton réfractaire implique plusieurs étapes, allant de la sélection des matériaux à leur mélange et à leur coulée. Voici une vue d'ensemble des étapes typiques du processus de fabrication du béton réfractaire :

#### **4.9.1. Préparation du béton réfractaire**

##### **a) Sélection et dosage des matériaux**

Les matériaux utilisés dans la fabrication du béton réfractaire comprennent des agrégats réfractaires, des liants réfractaires et éventuellement des additifs pour améliorer certaines propriétés du béton réfractaire.

Le choix de ces matériaux dépend des propriétés physiques, chimiques ou de résistance mécanique que l'on souhaite obtenir en terme d'absorption de chaleur ou d'isolation, de conductivité et de résistance aux chocs mécaniques.

Les matériaux sont dosés selon une formule spécifique pour obtenir les propriétés désirées du béton réfractaire. Les proportions des différents composants sont soigneusement calculées pour assurer une performance optimale du matériau final.

### **b) Gâchage mécanique**

Les matériaux sont mélangés ensemble dans un malaxeur approprié pour assurer une distribution uniforme des composants et une homogénéité du mélange. Voici quelques recommandations pour la confection des mélanges :

- Utiliser un mélangeur à axe vertical (proscrire la bétonnière).
- Nettoyer et humidifier le mélangeur avant le début du travail.
- Avant d'ajouter l'eau, homogénéiser rapidement le béton en faisant fonctionner le mélangeur quelques secondes à sec.
- Introduire alors les trois quarts de l'eau nécessaire, puis ajouter progressivement le reste de l'eau jusqu'à obtention de la consistance recherchée.
- Malaxer suffisamment longtemps, au moins trois minutes : un malaxage trop court nécessitera un ajout d'eau plus important, influençant défavorablement les propriétés mécaniques du béton.

### **4.9.2. Mise en œuvre du béton réfractaire**

La mise en œuvre d'un béton réfractaire s'opère à partir d'un mélange pulvérulent livré à l'état sec et utilisé après addition d'eau de gâchage. Il est mis en place par coulage sans vibration (auto-écoulement), par coulage avec vibration, par tringlage, par projection ou, si nécessaire, par damage manuel. La liaison hydraulique se forme et le durcissement s'opère sans apport énergétique extrême. Voici un aperçu des principales étapes de la mise en œuvre du béton réfractaire :

#### **a) Coulage**

Le béton réfractaire est coulé dans des moules appropriés ou directement appliqué sur la surface à revêtir, en fonction de l'application spécifique. Il est important de travailler rapidement car le béton réfractaire peut commencer à durcir rapidement, surtout à des températures élevées.

Voici quelques considérations importantes lors du coulage du béton réfractaire :

- Le béton doit être coulé et vibré simultanément, à l'aide de vibrateurs externes, ou d'aiguilles vibrantes.
- Il est déconseillé de survibrer.
- Le passage de la surface libre du béton d'un aspect mat à un aspect brillant signale une densification maximale.
- Éviter de lisser à la truelle.
- La mise en place d'une charge de malaxeur doit être terminée 30 minutes après la fin du malaxage.

### **b) Séchage**

Une fois coulé ou appliqué, le béton réfractaire est laissé à durcir et à sécher pendant une période spécifiée. Le temps de durcissement peut varier en fonction des conditions ambiantes, de la formulation du béton et d'autres facteurs.

Le séchage ne devra pas être trop rapide pour les raisons suivantes :

- Les bétons ont une plus faible porosité que les briques ou les matériaux réfractaires plastiques de qualité comparable, ce qui rend l'élimination de l'eau plus difficile lorsqu'ils sont chauffés.
- Un chauffage trop rapide peut provoquer la création de fissures qui se formeront sur la face froide puis se propageront à travers le garnissage jusqu'à la face chaude. Il est souhaitable que la température s'élève lentement, à raison de 50 °C par heure jusqu'à 110 °C, puis soit maintenue à cette valeur pendant une durée minimum de 18 à 24 h de manière à permettre l'élimination progressive de l'eau contenue dans le béton.
- Pour la cuisson, il est suggéré d'élever graduellement la température jusqu'à 550 à 600 °C à raison de 2 h par 25 mm d'épaisseur (par exemple en 12 h pour une épaisseur de 150 mm) et d'effectuer un pallier de 8 h à cette température. Ensuite, la température est élevée à raison de 50°C par heure environ, jusqu'à la température d'opération.

### **c) Décoffrage**

Le décoffrage pourra intervenir après 8 à 12 heures de durcissement. En principe, maintenir le béton en atmosphère humide à température ambiante au moins 24 heures après durcissement.

La mise en température doit être effectuée en tenant compte de l'épaisseur et du volume du béton à traiter, chaque garnissage étant un cas particulier.

#### **d) Première mise à feu**

Un premier chauffage à basse température peut être effectué (étuvage, soufflage d'air chaud à 110°C) dans certaines unités et surtout en laboratoires pour pouvoir accélérer la prise ainsi que la stabilisation des hydrates et éliminer l'eau libre résiduelle de façon contrôlée.

### **4.10. Transport du béton réfractaire**

Le béton réfractaire est généralement transporté dans des conteneurs spécialement conçus pour garantir sa protection pendant le transport. Ces conteneurs peuvent être des sacs étanches, des caisses ou des fûts en acier. Le choix du conteneur dépend de la quantité de béton réfractaire à transporter et des conditions spécifiques de l'application.

Certaines précautions particulières être prises en compte lors du transport du béton réfractaire pour garantir sa protection et son intégrité tout au long du processus de livraison jusqu'à son utilisation finale dans l'application prévue.

- Le béton réfractaire peut être sensible à l'humidité, surtout s'il contient des liants hydrauliques qui peuvent durcir au contact de l'eau. Il est donc important de protéger le béton réfractaire contre l'humidité pendant le transport en utilisant des conteneurs étanches et en évitant toute exposition prolongée à la pluie ou à l'humidité excessive.
- Le béton réfractaire est souvent coulé dans des moules ou des formes spéciales et peut nécessiter un traitement délicat pendant le transport pour éviter toute déformation ou tout dommage. Il est important de choisir des méthodes de transport appropriées et d'utiliser des dispositifs de fixation et de calage pour assurer la stabilité du chargement pendant le transport.
- Certains types de béton réfractaire peuvent être sensibles aux températures extrêmes pendant le transport. Il est important de prendre en compte les conditions climatiques lors du transport et d'éviter toute exposition prolongée à des températures extrêmement élevées ou basses qui pourraient affecter les propriétés du matériau.
- Le béton réfractaire peut être lourd et nécessite souvent des équipements de manutention spéciaux, tels que des chariots élévateurs ou des grues, pour le charger et le décharger en toute sécurité. Il est important de suivre les protocoles de sécurité appropriés lors de la manipulation du béton réfractaire pour éviter les blessures et les accidents.

### 4.11. Contrôle

Les contrôles du béton réfractaire sont essentiels pour garantir sa qualité, sa conformité aux spécifications et sa performance dans l'application prévue. Voici quelques-uns des contrôles courants effectués sur le béton réfractaire :

- Avant la fabrication du béton réfractaire, les matières premières utilisées, y compris les agrégats réfractaires, les liants et les additifs, doivent être soumis à des tests pour s'assurer de leur conformité aux spécifications requises. Cela peut inclure des tests de pureté, de granulométrie, de composition chimique, etc.
- Pendant le processus de mélange du béton réfractaire, des échantillons sont prélevés à intervalles réguliers pour vérifier la consistance du mélange, la distribution uniforme des matériaux et d'autres caractéristiques importantes. Des tests de résistance peuvent également être effectués sur ces échantillons pour évaluer les propriétés mécaniques du béton réfractaire.
- Lors de l'application du béton réfractaire sur la surface préparée, des contrôles sont effectués pour garantir une application uniforme, une compaction adéquate et une adhérence appropriée à la surface. Des inspections visuelles peuvent également être effectuées pour détecter tout défaut ou toute anomalie pendant le processus de mise en œuvre.
- Une fois le béton réfractaire mis en place, des tests sont effectués pour surveiller le processus de séchage et de durcissement. Cela peut inclure des mesures de température, d'humidité et de résistance mécanique pour évaluer la progression du durcissement et s'assurer que le béton réfractaire atteint les propriétés désirées.
- Après le durcissement complet, des tests de résistance à la chaleur sont effectués pour évaluer la capacité du béton réfractaire à résister aux températures élevées dans l'application prévue. Cela peut impliquer des tests de résistance à la chaleur, des tests de choc thermique, des tests de résistance à la corrosion chimique, etc.
- Une fois toutes les étapes de fabrication et de mise en œuvre terminées, un contrôle qualité final est effectué pour vérifier que le béton réfractaire répond aux spécifications requises et aux normes de qualité. Cela peut inclure des inspections visuelles, des tests destructifs et non destructifs, des mesures dimensionnelles, etc.

#### **4.12. Avantages du béton réfractaire**

Le béton réfractaire offre plusieurs avantages qui en font un matériau précieux dans de nombreuses applications industrielles nécessitant une résistance à des températures élevées, à l'abrasion et aux produits chimiques. Voici quelques-uns des principaux avantages du béton réfractaire :

- Facilité de mise en œuvre ;
- Sert à la diminution des risques par le feu et du coût de maintenance;
- Un matériau de conservation;
- Un bon isolant thermique et phonique;
- Peuvent être conçues pour être anti-acide.

#### **4.13. Inconvénients du béton réfractaire**

Bien que le béton réfractaire présente de nombreux avantages, il comporte également quelques inconvénients à prendre en considération :

- N'est pas destiné pour les structures de grandes portées;
- Relativement fragile par rapport à d'autres matériaux, surtout lorsqu'il est soumis à des chocs thermiques répétés ;
- Certains types de béton réfractaire peuvent être sensibles à l'humidité, en particulier ceux contenant des liants hydrauliques qui durcissent au contact de l'eau ;
- Nécessite une manipulation délicate lors de la fabrication, du transport et de la mise en œuvre. Des précautions doivent être prises pour éviter tout dommage pendant ces processus ;
- Nécessite une maintenance régulière pour assurer sa durabilité à long terme ;
- Un matériau couteux.

#### **4.14. Domaine d'application**

Une fois durci, le béton réfractaire est prêt à être utilisé dans une variété d'applications industrielles nécessitant une résistance à la chaleur, à l'abrasion et aux produits chimiques.

Voici quelques-uns des principaux domaines d'application du béton réfractaire :

- Les dallages industriels;
- Les voies déroulement des aéroports;
- Les pieux forés;

- Revêtement de protection;
- Certains produits préfabriqués;
- Les réparations de chaussées ou de trottoirs;
- Le béton projeté en tunnel.

#### **4.15. Conclusion**

En conclusion, un béton réfractaire est donc un matériau composite, dont les agrégats donnent les caractéristiques réfractaires et la matrice assure la tenue mécanique. C'est un matériau essentiel dans de nombreux secteurs industriels où des températures élevées, des conditions abrasives et des environnements chimiquement agressifs sont présents.

La formulation du béton réfractaire implique le choix judicieux des matériaux constitutifs et des proportions appropriées pour obtenir les propriétés désirées du matériau final.

Bien qu'il présente quelques inconvénients, tels que son coût initial plus élevé et sa fragilité relative, ses avantages en termes de durabilité, de résistance et de polyvalence en font un matériau irremplaçable dans de nombreuses industries.

**CHAPITRE 5**  
**Bétons projetés**

## CHAPITRE 5

# Bétons Projetés

---

### Sommaire

---

5.1 Introduction .....	67
5.2. Définition .....	68
5.3. Historique .....	68
5.4. Les techniques de réalisation .....	69
5.4.1. Projection par voie sèche.....	70
5.4.2. Projection par voie humide .....	71
5.5. Avantages et inconvénients de chaque technique de projection.....	71
5.6. Outillage.....	72
5.7. Composition.....	75
5.8. Formulation des bétons projetés .....	76
5.9. Propriétés des bétons projetés .....	78
5.10. Approvisionnement.....	79
5.11. Mise en œuvre .....	79
5.12. Contrôle.....	80
5.13. Avantages .....	81
5.14. Inconvénients du béton projeté .....	82
5.15. Domaines d'utilisation des deux grandes méthodes de projection .....	82
5.16. Conclusion.....	83

## 5.1 Introduction

La projection est une technique qui joue un rôle significatif dans la technologie moderne des bétons en offrant de nombreux avantages. Le béton projeté est très certainement le matériau qui suscite le plus d'intérêt dans le monde des tunnels. Dès son apparition, il est apparu comme une solution pratique au renforcement des voûtes des mines par sa facilité, et sa

flexibilité d'emploi. Même si plusieurs propriétés sont communes au béton projeté et au béton coulé, le béton projeté a plusieurs particularités qui lui sont propres. Ce chapitre se veut donc une présentation des fondements théoriques et pratiques indispensables à la compréhension du béton projeté.

## 5.2. Définition

Le béton projeté est une technique de construction largement utilisée dans l'industrie du bâtiment. Ce procédé permet de renforcer et réparer les structures existantes en appliquant directement du béton sur la surface à traiter.

Cette mise en œuvre diffère de celle du béton coulé car :

- Elle ne nécessite pas de coffrage : le béton est projeté sur un support auquel il adhère et constitue un ensemble monolithique capable de résister aux sollicitations pour lequel l'ouvrage a été dimensionné. Cela en fait un procédé particulièrement adapté à des surfaces courbes, irrégulières ou d'accès difficiles.
- Elle n'est pas gravitaire : de l'air comprimé est utilisé pour projeter du béton ou du mortier à haute vitesse sur la surface réceptrice. La compaction du béton est donc réalisée par le flux impactant et non par vibration.



Figure 5-1 : les bétons projetés

## 5.3. Histoire

L'invention du système de béton projeté date du début du XXème siècle aux Etats Unis. Son inventeur, Carl Akeley, développa une machine servant à projeter du plâtre via de l'air

comprimé, afin de ravalier la façade du musée dans lequel il travaillait. Son système, à double chambre, fût breveté entre 1909 et 1911. Et c'est dès 1911 que son utilité s'est avérée dans le domaine du génie civil, notamment pour la stabilisation des berges de la tranchée « Culebra cut » du canal de Panama. Le principe consistait à faire passer un mélange de matériaux sec (ciment, sable et gravillons) dans deux chambres pressurisées alternativement avant de le transporter jusqu'à la lance où il était mouillé, puis de le projeter sur un support ; c'est la projection par voie sèche. Puis, en 1940, un nouveau procédé par voie mouillée vit le jour. Cette technique s'appuie sur le principe de la vis d'Archimède et autorisant un chargement en continu des matériaux et permettant un débit de projection plus élevé. C'est avec l'apparition en 1947 de la machine à rotor en remplacement de la vis que naît vraiment le béton projeté moderne. Tout en gardant l'intérêt du chargement continu et des débits élevés, cette nouvelle technique autorise des distances machine-projection plus longues. En 1970, une autre grande innovation vue le jour, la projection par voie mouillée. Dans cette méthode, l'eau de gâchage est introduite au moment du malaxage. Et à ce jour, les innovations sont en cours et elles portent sur : le perfectionnement du matériel de projection, l'utilisation de systèmes automatiques, de commandes à distance, l'utilisation de lances permettant l'incorporation de fibres de toute nature, perfectionnement de doseurs d'adjuvants asservis aux débits des machines, surpresseurs d'eau, contrôleur de teneur en eau en voie sèche et bras mécaniques porte-lances.

#### **5.4. Les techniques de réalisation**

Le béton projeté est un béton formulé à partir de ses constituants habituels, transporté dans un tuyau, accéléré par un jet d'air comprimé et mis en œuvre par projection sur un support auquel il adhère. L'énergie cinétique conférée par l'air comprimé compacte le mélange qui devient ainsi dense et homogène. Dans certains cas, cette force de compaction est complétée par l'impact des gravillons les plus gros qui viennent percuter le matelas de béton déjà mis en œuvre et accentuent le compactage du béton projeté.

La confection et la diffusion du béton projeté se font essentiellement à l'aide de deux techniques de projection : la projection par voie humide et la projection par voie sèche.

Dans les deux cas, le béton est projeté à l'aide d'une machine spécifique, mais avec une différence au niveau de l'étape de mouillage, détaillée ci-dessous.

### 5.4.1. Projection par voie sèche

Pour la projection par voie sèche, le béton est inséré sous forme pulvérulente sèche ou pré-humidifiée dans la machine de projection. L'eau de gâchage est ajoutée en bout de lance ou un peu en amont selon la distance de pré-mouillage voulue. C'est le porte-lance qui règle l'apport en eau pour obtenir la consistance désirée. Le béton n'est pas malaxé avec l'eau en amont du processus, et ne devient du « béton » au sens technique du terme, qu'au sortir de la lance. Les mélanges complètement secs (liant, sable et gravillons) sont soumis aux mêmes règles de stockage que le ciment. Il est possible de les pré-humidifier, juste avant la projection, en y ajoutant entre 2% et 5% d'eau par rapport au poids sec des granulats. Cela permet de limiter l'émission de poussière et d'améliorer l'homogénéisation du mélange dans le flux d'air, mais elle limite aussi la durée d'utilisation du mélange. La figure ci-dessous présente un Schéma de l'accrochage mécanique du béton projeté par voie sèche sur le support

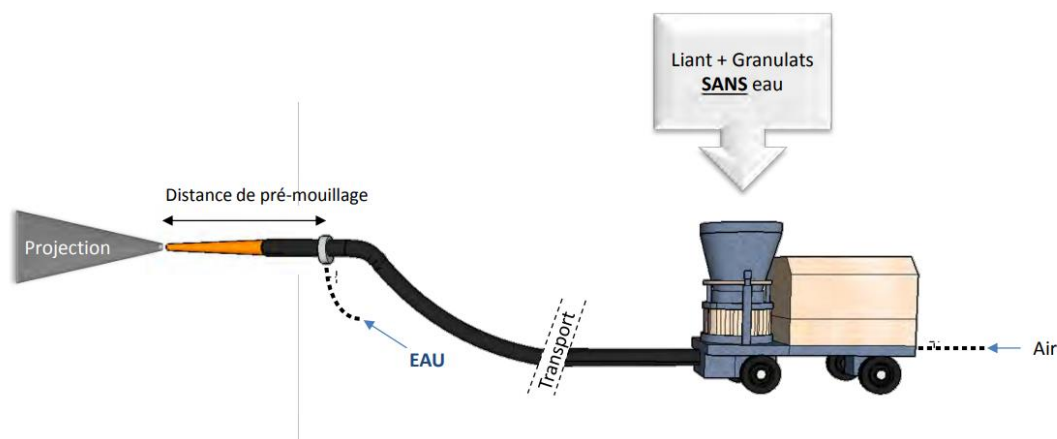


Figure 5-2 : Schéma de principe de projection par voie sèche

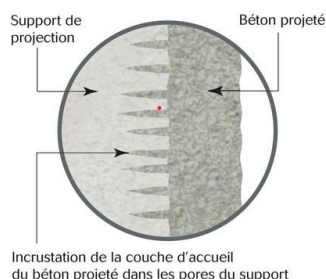


Figure 5-3 : Schéma de principe de projection par voie sèche sur le support

### 5.4.2. Projection par voie humide

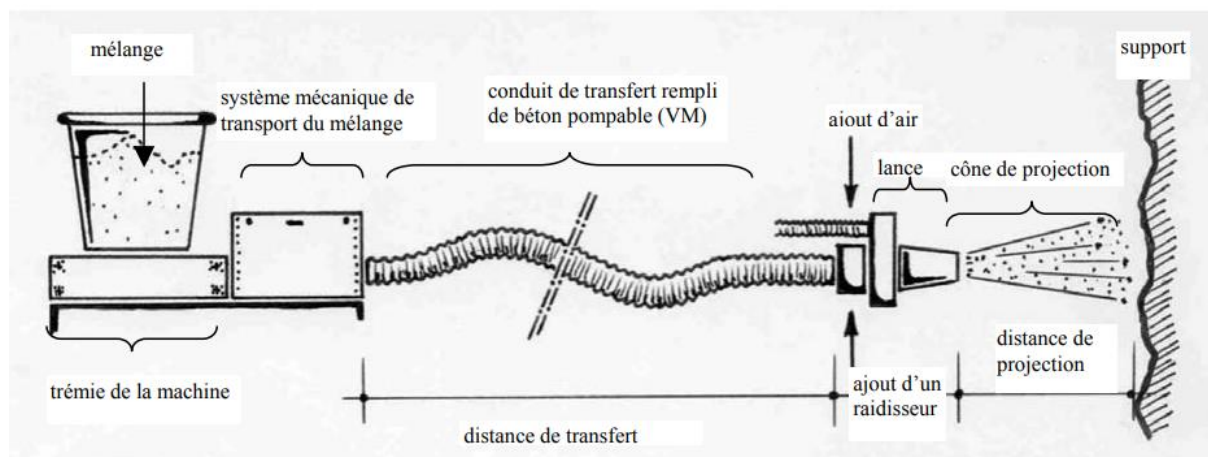


Figure 5-4 : procédé de projection du béton par voie humide

Le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimé ajouté à la lance. Le procédé par voie humide est surtout utilisé lorsque les volumes à produire sont importants. Le contrôle de la qualité est plus simple avec ce procédé, puisqu'en utilisant un béton conventionnel, le dosage des constituants du mélange est connu.

### 5.5. Avantages et inconvénients de chaque technique de projection

Les deux méthodes de projection présentent des avantages et des inconvénients, présentés dans le Tableau 5.1, qui permettent de privilégier l'une ou l'autre des techniques en fonction du type de travaux à réaliser.

Tableau 5.1 - Avantages et inconvénients du procédé de projection par voie sèche et humide

Voie Sèche	Voie Humide
<b>Avantages</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contrôle instantané de l'apport d'eau et de la consistance du mélange ;</li> <li>• Transport sur de longues distances possible (&gt;500m) ;</li> <li>• Manœuvre aisée des tuyaux (faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teneur en eau régulière;</li> <li>• Régularité de la consistance;</li> <li>• Moins de poussières et de pertes qu'en voie sèche ;</li> <li>• Rebond plus faible des granulats</li> </ul>

<p>masse lors de la projection, et tuyau vide à l'arrêt) ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Processus aisé à interrompre et redémarrer ;</li> <li>• Nettoyage rapide ;</li> <li>• Possibilité d'une plus grande épaisseur des passes;</li> <li>• Pas de surplus d'eau, retrait limité;</li> <li>• Bonne adhérence au support</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de précautions particulières contre l'humidité pour les granulats ;</li> <li>• Technique adaptée pour la mise en place de grands volumes ;</li> <li>• Peu de compétences requises du porte lance en comparaison d'un porte lance en voie sèche.</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production de poussière à la machine;</li> <li>• Protection du mélange contre l'humidité;</li> <li>• Fort rebond des granulats;</li> <li>• Réglage manuel de l'eau à la lance sur appréciation du porte-lance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transfert en grande distance difficile (précautions particulières dès 100m) ;</li> <li>• Pression importante dans les conduites;</li> <li>• Tuyau rempli de béton donc difficile à manipuler ;</li> <li>• Risque de bouchon accru;</li> <li>• Formulation exigeant une mise au point rigoureuse</li> <li>• Matériel plus contraignant à mettre en place</li> </ul>

## 5.6. Outillage

La projection du béton nécessite le recours à un outillage spécifique :

### a) Machines

Les machines à projeter le béton sont généralement :

- Des machines à rotor pour la projection par voie sèche,
- Des pompes à pistons pour la projection par voie mouillée.

Ces machines ont trois organes (cf figure 5.5) :

- La trémie de stockage des mélanges,
- Un principe mécanique qui expulse le mélange de la machine,
- Le tuyau de transfert.

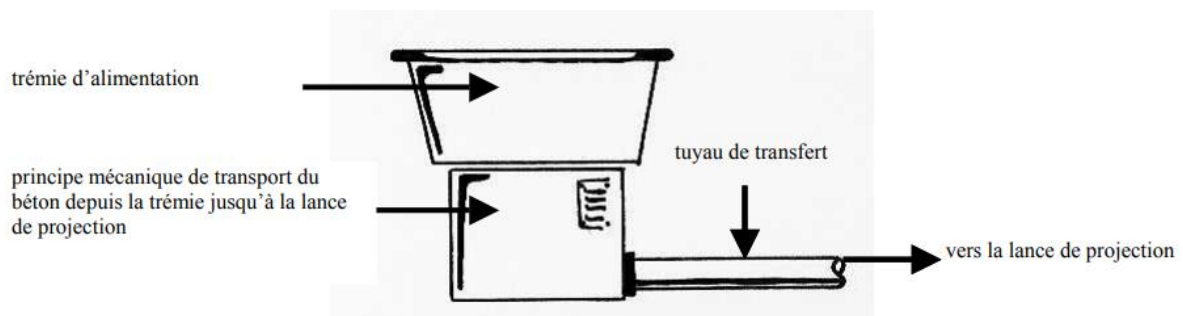
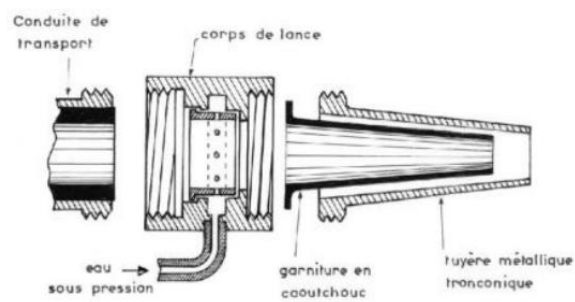


Figure 5-5 : schéma d'une machine à projeter

### b) Lance de projection

La lance de projection est l'élément principal de l'équipement de projection. Elle est composée :

- D'une conduite de transport.
- D'un corps de lance, accueillant le robinet et l'anneau d'introduction de l'eau. Il est possible de décaler l'anneau d'eau en fonction de la distance de pré-mouillage voulue. Dans ce cas, le robinet reste situé sur le corps de lance, mais l'anneau pour l'introduction de l'eau est situé un peu plus vers l'amont.
- D'un embout, appelé buse ou tuyère :
  - Soit de forme tronconique, et produisant un effet venturi pour l'accélération du mélange en sortie de lance ;
  - Soit de type Spirolet (dispositif breveté) ou double bulle permettant une meilleure homogénéisation du mélange.



*Principe des lances de projection par voie sèche*

Figure 5-6 : Schéma de principe de la lance de projection voie sèche

L'opérateur chargé de la projection est appelé porte-lance ou lancier. Il est un élément clé de la bonne mise en œuvre du béton, car c'est lui qui règle l'apport en eau (voie sèche), la distance à la surface, l'orientation de la lance et le mouvement de projection.

### **c) Compresseur d'Air**

Un compresseur d'air est utilisé pour générer l'air comprimé nécessaire à la propulsion du béton à travers la lance de projection.

### **d) Les tuyaux de transport**

Les tuyaux de transport sont le moyen le plus courant pour acheminer le béton projeté depuis la centrale à béton ou le camion malaxeur jusqu'à la lance de projection. Ces tuyaux sont généralement en caoutchouc renforcé ou en acier, et ils sont conçus pour résister à la pression élevée du béton en mouvement. Ils sont généralement équipés de raccords rapides pour faciliter le montage et le démontage, ainsi que pour permettre des changements rapides de direction et d'orientation lors du processus de projection.

### **e) Pompes à Béton**

Dans certains cas, des pompes à béton peuvent être utilisées pour transporter le béton projeté sur de longues distances ou dans des endroits difficiles d'accès. Les pompes à béton utilisent une pompe à piston ou à vis pour pousser le béton à travers des tuyaux de transport jusqu'à la lance de projection.

Les pompes à béton offrent une plus grande flexibilité et une capacité de transport plus importante par rapport aux tuyaux de transport simples, ce qui les rend idéales pour les projets de grande envergure ou les applications dans des environnements difficiles.

### **f) Dispositifs de Contrôle et de Sécurité**

L'équipement de projection est équipé de dispositifs de contrôle et de sécurité pour réguler la pression de l'air, le débit du béton, la température du compresseur, etc. Ces dispositifs garantissent un fonctionnement sûr et efficace de l'équipement tout au long du processus de projection.

### **g) Accessoires de Protection**

Des accessoires de protection tels que des équipements de protection individuelle (EPI), des écrans de protection, des barrières de sécurité, etc., peuvent être utilisés pour assurer la sécurité des opérateurs et des travailleurs sur le chantier de construction.

## 5.7. Composition

Le béton projeté résulte de la projection par air comprimé d'un mélange sur un support auquel il adhère. Le mélange est composé de ciment, de sable, de graviers ou de gravillons et éventuellement d'eau, d'adjuvant, et des fibres ou des fumées de silice.

### a) Ciment

Les deux types de ciment les plus souvent utilisés en béton projeté sont le ciment Portland ordinaire et le ciment Portland à haute résistance initiale. Le CPA est utilisé en raison du fait qu'il ne contient pas de fines d'ajouts qui risquent d'interférer avec les fines des formulations. Par ailleurs, ils offrent des résistances acceptables. Quant au ciment à haute résistance initiale, il autorise un durcissement rapide, ce qui facilite la réalisation de plusieurs couches successives en peu de temps sans recourir aux accélérateurs de prise.

### b) Granulats

En béton projeté par voie sèche, la distribution granulométrique du béton a surtout un effet sur le rebond. La composition du béton avant la lance et la composition en place du béton doivent également être prises en compte. Évidemment, les différentes tailles de particules ne rebondissent pas de la surface à des taux équivalents. Une bonne distribution granulométrique avant projection permet d'obtenir un béton projeté en place durable et bien compacte.

### c) Sable

Compte tenu de l'importance de la propreté des sables, la valeur exigée pour l'équivalent de sable visuel doit être supérieure ou égale à 85. Cette valeur conditionne les critères de qualité du béton projeté ainsi qu'un bon passage en machine. Elle est indispensable pour les résistances supérieures ou égales à 40 MPa.

### d) Adjuvants

Les différents produits utilisés doivent être compatibles avec les autres composants du béton. Parmi les adjuvants et ajouts les plus utilisés en béton projeté, on peut citer :

- Les fluidifiants Souvent des super-plastifiants, permettent d'augmenter la plasticité des mélanges à projeter par voie mouillée sans accroître la teneur en eau.
- Les accélérateurs de prise ou raidisseurs Ils engendrent des prises très rapides (souvent moins d'une minute).

L'utilisation des adjuvants confère au béton des propriétés spécifiques lors de la mise en œuvre :

- Obtention et maintien de la fluidité, grâce à des stabilisateurs de prise introduits à la sortie de la centrale pour une optimisation des conditions de transport,
- Obtention de la consistance initiale, grâce à des activateurs introduits quelques mètres avant la lance,
- Mise en œuvre efficace grâce à des accélérateurs de prise (raidisseurs) introduits en bout de lance, mais entraînant parfois une baisse des résistances mécaniques à long terme.

#### **e) La fumée de silice**

L'utilisation de la fumée de silice dans le béton projeté diminue le taux des pertes par rebond et permet d'avoir des couches de béton projeté plus épaisses et donc améliorer l'aptitude à la projection (béton plus collant) ainsi que la durabilité (béton plus dense).

#### **f) Fibres**

L'adjonction de fibres confère au béton projeté des propriétés complémentaires qui dépendent de la quantité et du type de fibres :

- Cohésion améliorée du béton frais,
- Limitation des effets du retrait, amélioration possible des caractéristiques mécaniques (résistance accrue au cisaillement et à la flexion).

### **5.8. Formulation des bétons projetés**

La composition des mélanges à projeter n'est pas régie par une méthode de formulation précise. Des recommandations limitent l'étendue des paramètres à fixer tout en laissant une large marge de manœuvre. De fait, seule l'expérience permet d'évaluer la capacité des mélanges à être projetés et à répondre aux exigences mécaniques. Des essais de convenance sont nécessaires avant le chantier.

Pour remédier à cela, de plus en plus de chantiers utilisent un mélange prêt à l'emploi fabriqué en usine ou livré sec en silos, big-bags ou sacs pour les petits chantiers dont on connaît les caractéristiques en place et pour lequel on a de nombreuses références.

Une autre solution consiste à utiliser une formule ayant récemment servi pour un chantier, il faut cependant s'assurer que les conditions de chantier sont similaires et les caractéristiques des matériaux quasiment identiques (même granulométrie notamment).

L'obtention des caractéristiques requises et la reproductibilité de cette qualité dépend de la compétence de l'ouvrier de projection.

Voici quelques critères essentiels de formulation :

- La consistance : la norme NF P95-102 préconise une valeur d'affaissement de 12 cm.
- La teneur en éléments fins doit assurer une bonne lubrification des conduits, afin d'atténuer les risques de frottement et donc d'obturation des tuyaux.
- L'usage d'un fluidifiant ou plastifiant est très fortement recommandé pour augmenter la cohésion du mélange.
- Le diamètre du plus gros granulat doit être en rapport avec le diamètre de la lance.
- Dans les bétons projetés, le rapport sable/gravillons est souvent limité à 1, avec un diamètre maximal de 10 mm.
- Les rapports E/C pour la technique de projection par voie humide se situent dans la plage 0,4 à 0,5.
- Pour atteindre une formulation adéquate, il faut trouver un compromis sur chaque composant.
- Par rapport au béton coulé, le béton projeté est fortement dosé en ciment (400 - 450 kg/m<sup>3</sup>), en fines et nécessite souvent des fluidifiants pour augmenter la cohésion.
- L'ajout de fibres peut être une solution pour limiter les microfissurations et améliorer certaines caractéristiques mécaniques.

### Exemples de composition d'un béton projeté

Constituants	Procédé par voie humide (E/L = 0,43) avec air entraîné		
	Béton courant (kg/m <sup>3</sup> )	Béton avec fumées de silice (kg/m <sup>3</sup> )	Béton armé de fibres avec fumées de silice (kg/m <sup>3</sup> )
Eau	170	170	170
Ciment	400	360	360
Fumées de silice	-	40	40
Sable (à béton)	1 250	1 250	1 250
Granulat (10 mm max.)	500	500	500
Fibres d'acier (35 mm)	-	-	50
Agent entraîneur d'air	200 (ml/m <sup>3</sup> )	300 (ml/m <sup>3</sup> )	300 (ml/m <sup>3</sup> )
Réducteur d'eau	1 500 (ml/m <sup>3</sup> )	1 500 (ml/m <sup>3</sup> )	1 500 (ml/m <sup>3</sup> )
Superplastifiant	-	1 500 (ml/m <sup>3</sup> )	1 500 (ml/m <sup>3</sup> )
Affaissement désiré	8-10 (cm)	8-10 (cm)	8-10 (cm)
Teneur en air désirée	10-12 (%)	10-12 (%)	10-12 (%)

## 5.9. Propriétés des bétons projetés

Les bétons projetés ont des performances élevées comparés au béton ordinaire coulé, notamment :

### a) Adhérence

Le béton projeté présente une excellente adhérence à une grande variété de surfaces, y compris le béton existant, la roche, le métal et d'autres matériaux de construction. Cette propriété garantit une liaison solide entre le béton projeté et la surface à recouvrir.

### b) Résistance Mécanique

Le béton projeté offre une résistance mécanique élevée, ce qui lui permet de résister aux charges structurelles, aux forces de compression, de traction et de flexion, ainsi qu'aux contraintes liées à son environnement d'application. Les bétons projetés par voie sèche sont connus pour leur grande résistance en compression : un béton projeté par voie sèche courant atteint 50 MPa. Mais il est possible d'obtenir des bétons projetés par voie mouillée dont la résistance en compression est supérieure à celle d'un béton coulé comparable : gain de résistance en compression d'environ 18 % pour les bétons projetés par voie mouillée par rapport aux bétons coulés, que le béton soit ou non renforcé de fibres.

### c) Durabilité

Le béton projeté est conçu pour offrir une durabilité élevée dans des conditions environnementales variées, y compris les cycles de gel-dégel, l'exposition aux intempéries, les environnements marins, les attaques chimiques, etc.

### d) Imperméabilité

Le béton projeté est formulé pour offrir une résistance élevée à la pénétration de l'eau et d'autres liquides, réduisant ainsi les risques de corrosion des armatures et de détérioration due à l'humidité.

### e) Plasticité

Le béton projeté peut être appliqué de manière flexible sur des surfaces complexes ou irrégulières, offrant ainsi une grande polyvalence dans sa mise en œuvre.

### **f) Retrait**

La valeur du retrait par voie mouillée est équivalente à celle du béton coulé, tandis que pour la voie sèche, elle est trois fois plus faible.

## **5.10. Approvisionnement**

L'approvisionnement de la projeteuse peut se faire de différentes façons :

- Approvisionnement « manuel » : à la pelle ou avec un véhicule de type Bobcat, les ouvriers effectuent le remplissage du cône de la projeteuse. Cette technique demande cependant de la précision et de la vitesse car le barillet doit toujours être approvisionné, sous peine de ressentir des à-coups dans la lance ;
- Approvisionnement par camion toupie pour la voie mouillée et sèche : Certains camions malaxeurs sont spécialement conçus pour le transport du béton projeté. Ces camions sont équipés de systèmes de mélange et de transport intégrés qui permettent de préparer le béton frais sur place et de le transporter directement à la lance de projection. Les camions malaxeurs spéciaux offrent une solution complète pour le transport et la projection du béton projeté, ce qui réduit les besoins en équipement supplémentaire sur le chantier ;
- Approvisionnement par silo (pour la voie sèche) : pour des chantiers de longue durée, il est possible d'installer un silo au-dessus du rotor ;
- Approvisionnement par big-bags (pour la voie sèche) : les big-bags sont remplis de mélange en centrale. Ils sont approvisionnés par camion sur chantier. Les big-bags sont placés au-dessus du cône de la machine à projeter à l'aide d'un engin de levage et vidés dans le cône grâce à système d'ouverture par le dessous.

## **5.11. Mise en œuvre**

Le béton projeté est mis en œuvre par transfert dans un tuyau d'un mélange de ciment et de granulats, puis par projection à l'aide d'air comprimé sur un support quelconque.

Quelle que soit la méthode, la force de projection se traduit par des pertes (par rebonds et retombées) dans des proportions variables. Cette force de projection permet le compactage et assure ainsi au béton projeté ses qualités de résistance, compacité, étanchéité, réduction du retrait et adhérence à la paroi réceptrice.

La mise en œuvre du béton projeté se fait par « couches » successives.

On appelle « couche » chaque épaisseur de béton qu'on laisse faire sa prise, soit dans l'attente d'une nouvelle projection, soit parce que l'épaisseur requise est atteinte. Chaque couche de béton projeté est elle-même réalisée par « passes ».

On appelle « passe » l'épaisseur de béton frais que le porte-lance met en œuvre progressivement pour obtenir une couche. Cette méthode de projection tient à l'art du projeteur qui doit savoir comment travailler pour obtenir des couches homogènes. Les épaisseurs maximales d'une couche sont fonctions de nombreux paramètres tels que l'inclinaison du support, le type de support, le mode de projection et la consistance du béton, la densité de ferrailage, etc.

Le tableau 5-2. Précise les épaisseurs de couche maximale préconisé par l'ASQUAPRO (2007b).

Tableau 5-2. Les épaisseurs de couche maximale préconisé par l'ASQUAPRO (2007b).

	Sans adjuvant raidisseur	Avec adjuvant raidisseur ou accélérateur			
		T > 25°C	25°C > T > 20°C	20°C > T > 15°C	T < 15°C
Surface verticale	15 cm	25 cm	20 cm	15 cm	15 cm
En plafond	3 à 4 cm	12 cm	8 cm	6 cm	5 cm

Après la projection, la surface projetée peut être finie et consolidée à l'aide d'outils tels que des spatules, des truelles ou des brosses pour lisser et compacter le béton, éliminer les imperfections et obtenir la texture souhaitée.

Une fois la projection terminée, le béton projeté est souvent soumis à un processus de cure pour assurer son durcissement approprié et sa résistance maximale. Des mesures de protection peuvent également être mises en place pour protéger la surface contre le dessèchement excessif ou les conditions environnementales défavorables pendant le processus de séchage.

## 5.12. Contrôle

L'épreuve de convenance doit permettre de tester toute la chaîne de mise en œuvre du béton projeté : depuis la fabrication (produit industriel ou mélange issu d'une centrale BPE ou mélange confectionné sur place) jusqu'à la projection en passant par le transport dans les tuyaux.

Cette épreuve doit donc être réalisée dans les conditions réelles de déroulement du chantier avec le même personnel, les mêmes matériaux, les mêmes supports, les mêmes équipements et la même méthode de projection que ceux qui seront utilisés durant la phase de production sur le chantier. Cette étape permet également de s'assurer de l'aptitude du mélange à être projeté.

Il est admis que les ajustements suivants soient confirmés à l'issue des épreuves de convenance :

- Ajustement de la formule nominale (adjuvant, activateur, eau) ;
- Dosage et choix des fibres.

Les épreuves de convenance doivent également faire le lien entre les caractéristiques du mélange à projeter visées par l'épreuve d'étude et les caractéristiques réelles du béton projeté. Les essais réalisés lors de l'épreuve de convenance portent donc sur le mélange à projeter avant projection ainsi que sur le béton projeté dans des caisses ou éventuellement sur un support. Par ailleurs, les épreuves de convenance et les essais réalisés doivent permettre, du fait de la spécificité des bétons projetés, d'ajuster les points suivants :

- Les paramètres de fonctionnement des installations de projection ;
- L'étalonnage de la pompe d'introduction de l'activateur (le cas échéant) et son système d'asservissement ;
- La pression d'eau et d'air comprimé à la lance de projection. Les épreuves de convenance doivent également inclure :
- La vérification de la technicité des opérateurs ;
- Le contrôle qualitatif de la mise en œuvre du béton projeté (préparation de surface, état de surface, régularisation du relief du support (le cas échéant), homogénéité du béton, etc.).

Les résultats des essais réalisés lors des épreuves de convenance doivent satisfaire les exigences prescrites.

### **5.13. Avantages**

L'utilisation de ce type de béton offre de nombreux avantages par rapport à celle du béton classique. Comme principaux avantages, nous pouvons entre autres parler des points ci-après :

- Ce béton ne nécessitant de coffrage autre que celui sur lequel il est projeté, il est plus facile à mettre en place que le béton coffré ;
- La rapidité d'exécution : une seule équipe suffit à projeter 10 m<sup>3</sup> de béton en une heure de travail ;
- L'esthétique : dans certains cas, le rendu esthétique de l'aspect extérieur d'un parement fait avec le béton projeté est bien meilleur que celui du béton coffré ;
- Une excellente adaptation au support, ce qui lui donne l'avantage d'être très pratique sur les chantiers les plus complexes ;
- Il possède une densité plus élevée, ce qui lui confère une bonne durabilité ;
- Un autre avantage de ce béton qui est fabriqué par propulsion est la possibilité de l'utiliser sur des chantiers très difficiles d'accès ou dans les endroits très étroits.

#### **5.14. Inconvénients du béton projeté**

- Résistance assez faible pour servir de revêtement porteur définitif.
- Une perte par rebond des matériaux importante.
- L'absence de méthode de formulation précise.
- Essais de caractérisation à l'état frais très coûteux du fait qu'ils doivent s'effectuer sur site avec une logistique lourde.
- La qualité du béton projeté dépend d'une multitude de facteurs, tels que la qualification du projeteur (porteur de lance), le type de support (souple ou rigide), la distance entre la lance et le support, la vitesse de projection, les conditions climatiques.

#### **5.15. Domaines d'utilisation des deux grandes méthodes de projection**

Les bétons projetés, grâce à leurs propriétés spécifiques et à leur adaptabilité, sont largement utilisés dans divers domaines de la construction pour une multitude d'applications. Voici quelques-uns des principaux domaines d'application des bétons projetés :

##### **a) Domaines exclusifs de la voie sèche**

Elles recouvrent les domaines où la qualité du béton, la compacité, l'adhérence et la limitation du retrait sont prépondérants : réparations et renforcement de structures, réalisation de voiles

minces avec armatures, projection de béton réfractaire, rejointoiement de maçonneries à joints larges et profonds, protection immédiate de terrain avec activité discontinue et volume unitaire restreint (blindage de puits, de tunnel, plots alternés en soutènement, reprise en sous-œuvre).

### **b) Domaines où la voie sèche est prépondérante**

La projection en falaise, la réalisation de soutènements : parois clouées, parois berlinoises, la rénovation d'ouvrages souterrains (route, voie ferrée, exploitation minière, canal), la projection de béton haute performance

### **c) Domaines exclusifs de la voie humide**

Travaux en espace très confiné sans possibilité de ventilation (galerie de faible section, galerie hydraulique, collecteur d'assainissement visitable), projection de béton de sable (renforcement en assainissement).

### **d) Domaines où la voie humide est prépondérante**

Projection sur support fragile (textile, coffrage carton, terrains sableux en tunnel), soutènement en tunnel nécessitant des cadences importantes de projection ( $> 6 \text{ m}^3 / \text{h}$ ), rejointoiement de maçonneries avec joints étroits (inférieur à 1 cm) ; nécessité d'une machine à débit variable en continu.

### **e) Domaines communs aux deux méthodes**

Travaux de tunnels, protections de berges et de perrés, construction de bassins, piscines, réservoirs, habitations, voile de renforcement de murs en maçonneries.

## **5.16. Conclusion**

Le béton projeté est une technique de construction polyvalente et durable. Il offre de nombreux avantages tels que la rapidité d'exécution, la résistance aux intempéries et la possibilité d'application dans divers domaines.

La composition du béton projeté peut varier en fonction des spécifications du projet et des conditions du site, mais généralement, elle comprend les mêmes composants de base que le béton conventionnel.

Les techniques de projection du béton projeté peuvent être réalisées selon deux méthodes : la voie sèche ou la voie humide. Chacune présente ses propres caractéristiques et adaptabilités en fonction des besoins du projet.

Le béton projeté trouve son utilisation dans divers domaines tels que les tunnels, les piscines, les murs de soutènement, les travaux de réparation et bien plus encore. En particulier, pour la construction de piscines, le béton projeté offre une solution efficace et durable grâce à sa capacité à épouser parfaitement toutes les formes souhaitées.

**CHAPITRE 6**  
**Bétons pompés**

# Bétons pompés

## Sommaire

6.1. Introduction .....	85
6.2. Histoire du béton pompé .....	86
6.3. Définition du béton pompé.....	87
6.4. Compréhension du mécanisme de pompage du béton.....	87
6.5. Composants .....	87
6.6. Exigences de formulation .....	88
6.7. Propriétés essentielles.....	89
6.8. Fabrication.....	90
6.9. Transport-mise en œuvre et contrôle .....	91
6.9.1. Transport du béton pompé .....	91
6.9.2. Mise en œuvre et matériels du pompage .....	92
6.9.3. Contrôle du béton pompé .....	96
6.10. Problèmes rencontrés lors du pompage du béton .....	97
6.11. Pompage des bétons spéciaux .....	98
6.12. Aspects de sécurité lors de l'emploi des pompes à béton .....	98
6.13. Recommandations pour le pompage du béton.....	98
6.14. Les atouts de pompage du béton .....	99
6.15. Domaines d'application.....	100
6.16. Conclusion .....	102

### 6.1. Introduction

Le béton pompé est une avancée majeure dans le domaine de la construction, modifiant radicalement la méthode de transport et de coulée du béton sur les chantiers. Cette technique offre une solution efficace pour acheminer le béton vers des endroits difficiles d'accès ou éloignés, tout en maintenant ses propriétés et sa qualité intactes. Dans ce cours, nous explorerons en détail la définition, les principes, les méthodes et les applications du béton pompé, en mettant l'accent sur son importance dans l'industrie de la construction moderne.

## 6.2. Histoire du béton pompé



Figure 6-1: Le béton pompé

L'histoire du béton pompé remonte aux premières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle. Les premières pompes à béton ont été développées dans les années 1930. Elles étaient rudimentaires par rapport aux versions modernes, mais elles ont ouvert la voie à une méthode de coulage du béton plus efficace et précise. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les pompes à béton ont été utilisées de manière significative dans la construction de bunkers, de routes et d'autres infrastructures militaires. Cela a contribué à la popularité croissante de cette technique.

Au fil des décennies, les pompes à béton ont connu des améliorations technologiques significatives. Les matériaux utilisés dans leur construction ont été améliorés pour augmenter leur durabilité et leur efficacité. Les systèmes de contrôle ont également été perfectionnés pour permettre un coulage plus précis du béton.

À partir des années 1960 et 1970, le béton pompé est devenu une méthode de plus en plus populaire dans l'industrie de la construction. Les entreprises ont constaté les avantages de cette technique en ce qui concerne la rapidité, la précision et la sécurité.

De nos jours, le béton pompé est largement utilisé dans une variété de projets de construction, allant des grands projets d'infrastructures aux projets commerciaux et résidentiels. Les pompes à béton modernes sont capables de manipuler de grandes quantités de béton sur de longues distances, ce qui les rend indispensables dans de nombreuses situations de construction.

### **6.3. Définition du béton pompé**

Le béton pompé est une technique de coulage du béton qui utilise une pompe à béton pour le déplacer du point de mélange vers l'endroit de coulage à travers des tuyaux de pompage rigides ou flexibles et de décharger le béton directement à l'endroit voulu. Il doit respecter un certain nombre de conditions : il doit rester homogène tout au long du pompage : il doit pouvoir se déformer pour passer dans les coudes et réductions, etc.

### **6.4. Compréhension du mécanisme de pompage du béton**

Le phénomène de pompage du béton est une combinaison complexe de forces physiques et de caractéristiques du matériau. Lorsque le béton est introduit dans la pompe à béton, une pression est exercée sur le matériau pour le propulser à travers les conduites de distribution. Cette pression est générée par les pompes à piston ou à vis rotative à l'intérieur de l'équipement de pompage. Pendant le pompage, le béton est soumis à des forces de frottement le long des parois internes des conduites de distribution. Ce frottement peut entraîner une perte de pression et une réduction de la vitesse du béton, ce qui nécessite parfois l'application de pressions plus élevées pour maintenir un débit constant. Le béton se déplace dans les conduites selon différents régimes d'écoulement, y compris un écoulement laminaire près des parois et un écoulement turbulent au centre du flux. Ces variations dans le comportement de l'écoulement peuvent affecter la répartition du béton lorsqu'il est coulé à l'endroit désiré.

En raison de sa densité, le béton est également sujet à l'effet de gravité pendant le pompage. Cela signifie que le matériau a tendance à s'accumuler au bas des conduites de distribution et peut nécessiter des techniques spéciales pour assurer un remplissage uniforme des coffrages ou des moules.

Les opérateurs de la pompe à béton peuvent ajuster le débit de béton en modifiant la vitesse de rotation des pompes ou en ajustant les soupapes de régulation de pression. Cela permet de s'adapter aux variations dans la configuration du chantier et de garantir un coulage précis du béton.

### **6.5. Composants**

Le béton pompé utilise généralement les mêmes composants de base que le béton traditionnel :

### **a) Ciment**

Différents types de ciment peuvent être utilisés en fonction des exigences du projet.

### **b) Granulat**

La distribution granulométrique du granulat doit être choisie de manière à ce que la courbe granulométrique soit la plus continue possible. Le granulat doit, non seulement posséder une granularité continue, mais aussi permettre une teneur suffisamment élevée en mortier fin. Les variations granulométriques, notamment de la classe granulaire 0/4 mm (sable), sont souvent à l'origine des difficultés de pompage. La classe granulaire 4/8 mm doit être limitée au maximum à 10 %.

### **c) Additions**

Parmi toutes les additions, la cendre volante est la plus appropriée. Grâce à sa forme sphérique, elle influence positivement l'aptitude au pompage des bétons qui peut ainsi être améliorée par un dosage de 30 à 50 kg/m<sup>3</sup>. De plus, elle est caractérisée par une faible demande en eau. En cas d'utilisation d'un granulat essentiellement concassé, elle est employée en complément pour ajuster la granularité (augmentation de la teneur en granulat fin).

### **d) Adjuvants**

En règle générale, l'emploi de fluidifiant est nécessaire pour obtenir une consistance adéquate du béton pompé. Pour améliorer l'aptitude au pompage, on peut recourir à un produit que l'on appelle agent de pompage, qui améliore la consistance du béton frais, réduit le ressuage et empêche la ségrégation. Les agents de pompage ne peuvent pas se substituer à une optimisation de la formulation du béton en vue de réduire la teneur en farine et le volume de mortier fin qui restent indispensables.

## **6.6. Exigences de formulation**

La formulation du béton pompé nécessite une attention particulière pour garantir que le mélange possède les propriétés nécessaires pour être pompé efficacement à travers les tuyaux et pour assurer la performance structurelle requise une fois qu'il est coulé.

Pour être pompable, le béton doit satisfaire les exigences suivantes:

- La teneur en ciment doit être supérieur à 250 kg/m<sup>3</sup> dans tous les cas;
- La teneur en pate doit être suffisamment grande pour assurer une distance moyenne

entre les granulats un peu plus grands que dans le squelette optimisé pour un béton classique;

- Le rapport E/C doit être compris entre 0,55 et 0,65;
- L'affaissement varie de 5 à 8 cm (parfois, il est possible d'avoir un affaissement de 3 à 12 cm)
- La teneur en sable doit être comprise entre 32 et 45% dans le cas d'utilisation de gravillons roulés et 40-45% dans le cas d'utilisation de gravillon concassés (par rapport au total des granulats);
- Les granulats doivent avoir une porosité la plus faible possible;
- Il est préférable d'utiliser des mélanges avec des granulats roulés car ils exigent une teneur en ciment moins importante pour une même maniabilité.

## 6.7. Propriétés essentielles

Les propriétés essentielles du béton pompé sont principalement liées à sa capacité à être transporté efficacement par une pompe à béton et à être coulé avec succès à l'endroit désiré sur le chantier. Voici quelques-unes des propriétés clés :

### a) Fluidité

Le béton pompé doit avoir une bonne fluidité pour être pompé efficacement à travers les tuyaux et les conduites de la pompe à béton sans obstructions ni blocages. Une fluidité adéquate facilite également le coulage du béton dans les zones cibles.

### b) Cohésion

Le béton pompé doit conserver une bonne cohésion pour maintenir son intégrité structurelle pendant le transport et le coulage. Une cohésion insuffisante peut entraîner une ségrégation des agrégats et une perte de résistance dans le mélange.

### c) Stabilité

Le béton pompé doit être stable pour éviter les phénomènes de sédimentation ou de séparation des constituants pendant le transport. Une bonne stabilité garantit une distribution uniforme des matériaux dans le mélange et minimise les risques de défauts dans le béton coulé.

### d) Ressuage

Le ressuage se réfère à la migration de l'eau à la surface du béton, ce qui peut entraîner une perte de résistance et une diminution de la qualité de la surface. Un béton pompé doit être

formulé de manière à minimiser le ressuage pendant le transport et le coulage.

### **e) Faible viscosité**

Une viscosité réduite facilite le pompage du béton à travers les conduites de la pompe à béton en réduisant la friction entre le béton et les parois des tuyaux. Cela permet un transport plus efficace sur de longues distances et à des hauteurs élevées.

### **f) Résistance**

Bien que la résistance ne soit pas une propriété spécifique au béton pompé, elle reste essentielle pour assurer la durabilité et la performance structurelle du béton une fois qu'il est coulé à l'endroit désiré. Le béton doit être conçu pour atteindre les niveaux de résistance requis pour répondre aux exigences du projet.

## **6.8. Fabrication**

La fabrication du béton pompé implique généralement les étapes suivantes :

- Les matériaux nécessaires pour fabriquer le béton, tels que le ciment, le sable, le gravier ou les granulats, ainsi que les adjuvants, sont sélectionnés en fonction des spécifications du projet et des exigences de pompage.
- Les proportions des différents composants du béton sont calculées en fonction du type de béton requis et des performances de pompage souhaitées. Des essais préliminaires peuvent être effectués pour ajuster les proportions et obtenir les propriétés désirées du mélange.
- Les composants du béton sont mélangés ensemble dans un mélangeur à béton. Le mélange est réalisé de manière à obtenir une distribution homogène des matériaux et à assurer la cohérence des propriétés du béton.
- Dans la majorité des chantiers d'ouvrages d'art, un essai de convenance est nécessaire pour valider la pompabilité de la formule de béton dans le contexte du chantier. Cet essai permet d'optimiser à la fois la composition du béton (ouvrabilité, consistance), la capacité de débit de la pompe, la configuration des installations ainsi que le mode opératoire du pompage.
- La pompe à béton est préparée en installant les tuyaux et les conduites nécessaires pour transporter le béton du mélangeur à béton jusqu'à l'endroit de coulage sur le chantier. La pompe est également vérifiée pour s'assurer qu'elle fonctionne correctement.

- Une fois que le béton est prêt, il est pompé à travers les tuyaux de la pompe à béton jusqu'à l'endroit de coulage sur le chantier. La pompe est utilisée pour contrôler le débit et la distribution du béton pendant le pompage.
- Une fois le béton pompé à l'endroit de coulage, il est déversé dans les coffrages ou les zones désirées sur le chantier. Des techniques spéciales peuvent être utilisées pour guider le béton dans les zones difficiles d'accès ou pour assurer une répartition uniforme du matériau.

## **6.9. Transport- Mise en œuvre et Contrôle**

Le transport, la mise en œuvre et le contrôle du béton pompé sont des étapes cruciales pour assurer le succès d'un projet de construction. Voici un aperçu de chacune de ces étapes :

### **6.9.1. Transport du béton pompé**

Le béton est transporté du site de production vers le chantier à l'aide de camions malaxeurs ou de camions de transport spéciaux équipés de réservoirs à béton. À l'arrivée sur le chantier, le béton est acheminé vers la pompe à béton à l'aide de convoyeurs ou de brouettes si nécessaire. Les tuyaux et les conduites de la pompe à béton sont positionnés pour acheminer le béton vers l'endroit de coulage désiré.

### **6.9.2. Mise en œuvre et matériels du pompage**

#### **a) Mise en œuvre**

Le pompage d'un béton à consistance raide nécessite une plus haute pression pour garantir le refoulement qu'un béton à consistance plastique. Avant de commencer le pompage, des essais de pompage peuvent être effectués pour vérifier la performance de la pompe et ajuster les paramètres si nécessaires. Le béton est pompé à travers les tuyaux de la pompe à béton jusqu'à l'endroit de coulage. Des opérateurs contrôlent la pompe pour ajuster le débit et la pression en fonction des besoins. Pendant le coulage, le béton est réparti uniformément dans les coffrages ou les zones de coulage à l'aide de techniques telles que le vibroplanage pour éliminer les poches d'air et assurer une compaction adéquate. Des méthodes spéciales peuvent être utilisées pour guider le béton dans les zones difficiles d'accès ou pour atteindre des hauteurs élevées, comme l'utilisation de trémies ou de bras de distribution télescopiques.

## b) Matériel de pompage

Le pompage du béton nécessite l'utilisation de différents types d'équipements spécialisés conçus pour transporter efficacement le béton du point de mélange jusqu'à l'endroit de coulage sur le chantier. Ces équipements de pompage du béton sont disponibles dans une variété de tailles et de capacités pour s'adapter aux exigences spécifiques de chaque projet de construction. Ils sont utilisés en combinaison avec d'autres équipements de construction pour assurer un transport et un coulage efficaces du béton sur le chantier. Voici les principaux équipements de pompage du béton:

### ➤ Pompe

Il s'agit d'un appareil qui sert à acheminer le béton au moyen de tuyaux rigides ou souples jusqu'aux lieux d'utilisation. La pompe à béton est un camion qui intègre directement la « pompe à béton ». Ce camion rend possible le déversement du béton dans des endroits difficiles d'accès par les moyens habituels. Le coulage du béton a lieu grâce à la pompe qui est constituée d'un bras hydraulique capable de se déplier sur plusieurs mètres. Elle est pilotée par une télécommande qui permet de la diriger simplement et précisément.

Il existe trois catégories de pompe à béton :

### Le malaxeur pompe

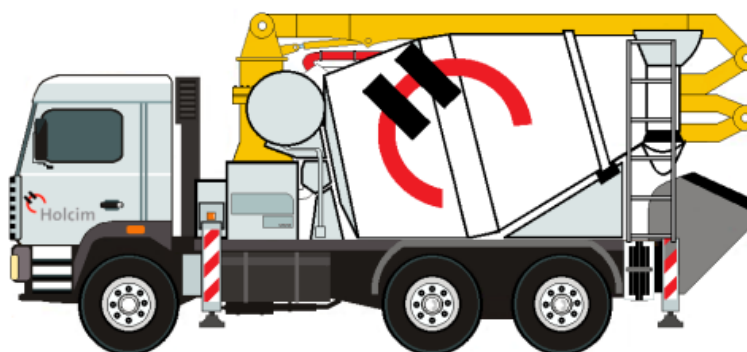


Figure 6-2: Malaxeur pompe mixo pompe

Le malaxeur pompe est un camion toupie auquel on a associé un bras de pompage. Il assure traditionnellement un débit de  $\sim 20$  à  $60 \text{ m}^3/\text{heure}$ , pour une flèche courante de  $\sim 21$  mètres. Le mixo pompe est adapté aux petits chantiers de la maison: une plage de piscine, une terrasse, une entrée de garage, une dalle de compression.

### Le camion pompe

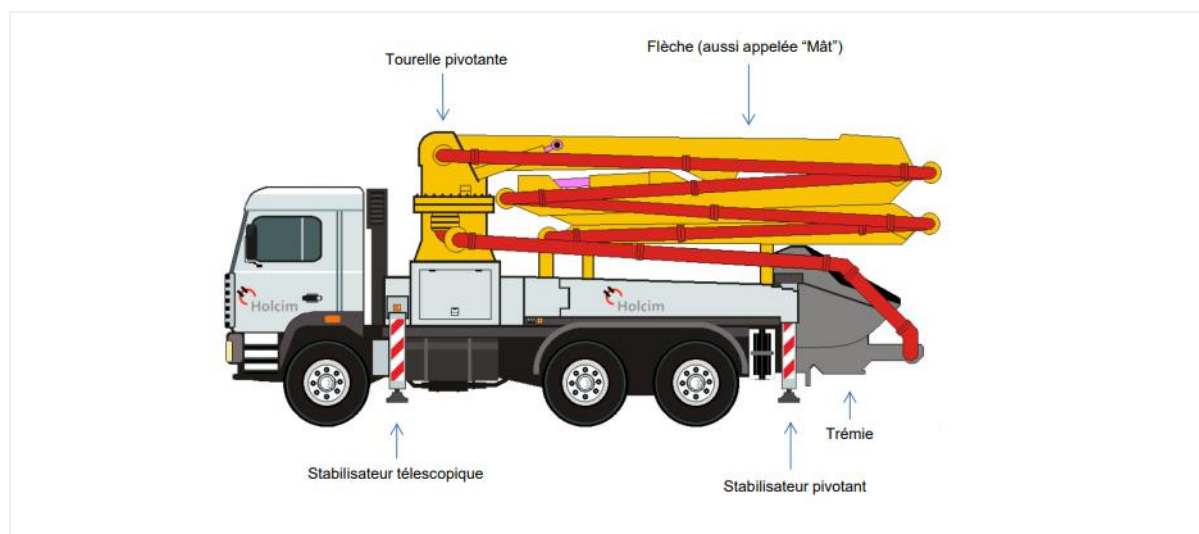


Figure 6-3: Le camion pompe

Le camion pompe porte le nom de « pompe automotrice ». Il est uniquement dédié au pompage du béton (et non à son transport). Sa flèche peut mesurer une soixantaine de mètres. Quant à son débit, il peut atteindre quelques  $\sim 200 \text{ m}^3/\text{heure}$ . Le camion pompe est mobilisé pour les coulages nécessitant des gros volumes : construction de maison, dallage, plancher.

### La pompe à béton stationnaire

La pompe à béton stationnaire est un petit dispositif placé sur des roues ou des chenilles qui comporte une tuyauterie, une unité de pompe et une trémie de chargement.

Les petites pompes à roues peuvent-être tractées par un véhicule, sur la voie publique et sur chantier.



Figure 6-4: Pompe à béton stationnaire

Traditionnellement, la pompe à béton se distingue selon deux technologies de pompage :

- La pompe à pistons qui permet d'obtenir des débits de pompage importants avec tout

type de béton. Elle est adaptée pour de grands débits et des pompages sur de longues distances. Le principe de la pompe à pistons consiste à alimenter un cylindre avec du béton frais et à refouler le béton au moyen d'un piston (débit jusqu'à 200 m<sup>3</sup> par heure).

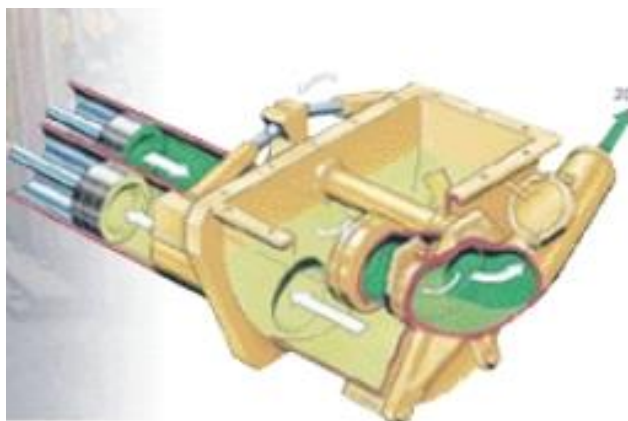


Figure 6-5: Pompe à pistons

- La pompe à rotor. Elle est plus adaptée aux pompages délicats tels que le pompage des bétons spéciaux (béton léger, béton autoplaçant...) .le principe d'une pompe à rotor consiste à faire circuler le béton dans un tronçon de tuyau souple et à pousser le matériau le long du tronçon vers la conduite de refoulement par un système de galets tournants qui compriment le tuyau (débit jusqu'à 80 m<sup>3</sup> par heure).

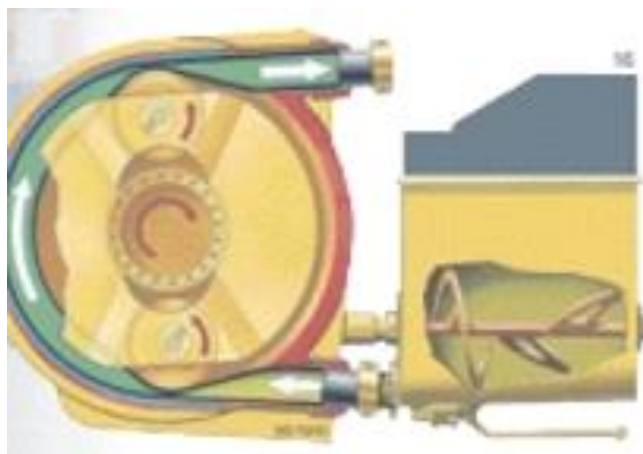


Figure 6-6: Pompe à rotor

#### ➤ Accessoires de pompage

En plus des pompes à béton elles-mêmes, différents accessoires sont utilisés pour faciliter le processus de pompage, tels que les tuyaux de pompage, les buses de distribution, les bras de distribution, les trémies de chargement, les systèmes de nettoyage des tuyaux, etc.

### **La trémie réceptrice**

La trémie réceptrice, dans laquelle le béton est acheminé du camion malaxeur vers la pompe, est pourvue d'une grille et d'un agitateur. La grille empêche que des grains trop gros ou des corps étrangers ne pénètrent dans la pompe. La grille dispose d'un système de verrouillage qui entraîne immédiatement l'arrêt de l'agitateur ou de la pompe en cas d'ouverture de la grille. Un vibreur peut être monté sur la grille pour faciliter le passage du béton plus épais dans les orifices de la grille. Cela permet d'éviter que de l'air ne soit aspiré, ce qui peut, dans certains cas, provoquer de fortes projections dans la zone de la trémie.



Figure 6-7: Exemple de trémie à béton

### **Tuyaux**

Pour que le pompage se déroule sans problème, il faut non seulement que la pompe soit bien adaptée et en bon état mais également que la tuyauterie réponde à certaines exigences. Les tuyaux utilisés pour le pompage du béton sont en acier et peuvent avoir les diamètres intérieurs suivants; 50, 65, 80, 100, 112, 125, 150, 180 et 200 mm.

### **Réductions et coudes**

Les réductions permettent de passer d'un diamètre de tuyau à un diamètre inférieur. L'écoulement du béton dans ces zones s'accompagne de contraintes et de déformations plus élevées qui augmentent les risques de bouchon. Il faut donc, en général, limiter le nombre de ces réductions dans un circuit.

Les coudes sont utilisés pour changer la direction de la tuyauterie. Ils sont caractérisés par leur angle et leur brayon. Il existe des coudes qui permettant détourner la tuyauterie de 10°, 15°, 22°, 30°, 45° et 90°. Quand le béton passe dans les coudes il est soumis à une force centrifuge. Cette force provoque une usure excessive de la paroi extérieure.

Pour compenser ce phénomène les coudes sont fabriqués avec une paroi extérieure plus épaisse que la paroi intérieure (par rapport à la trajectoire du béton).

### Les flèches de répartition

Quand on utilise des pompes à béton, le matériau doit être réparti le plus uniformément possible en sortie de circuit. Dans les cas ordinaires, on utilise des tuyaux flexibles, mais lorsque la surface de répartition devient importante ou peu accessible les flèches de répartition permettent d'augmenter la qualité et le rendement. Les portées des flèches de répartition varient entre 20 et 62 m. Parfois ces flèches peuvent être équipées d'un dispositif à grimper.

### Les stabilisateurs

Les stabilisateurs ont pour fonction de transférer les charges d'appui dans le sol afin d'assurer la stabilité de la pompe. Ils varient en fonction des dimensions de la flèche. Sur les grandes pompes, les stabilisateurs sont généralement disposés en croix. Mais sur les petites pompes, ils peuvent être disposés à angle droit par rapport à l'axe du véhicule.

### La commande de pompage à distance

Pour bénéficier d'un meilleur point de vue lors du pompage du béton, le machiniste doit utiliser une commande à distance. Dans ce cas, les commandes sur le véhicule doivent être isolées de manière efficace pour éviter tout usage non autorisé.



Figure 6-8: Exemple de commande à distance

### **6.9.3. Contrôle du béton pompé**

Un contrôle de qualité est effectué à chaque étape du processus, depuis la fabrication du béton jusqu'à son coulage sur le chantier :

- Des échantillons de béton peuvent être prélevés pour des tests en laboratoire afin de vérifier les propriétés du mélange, telles que la résistance et la densité.
- Pendant le coulage, des inspections visuelles sont effectuées pour détecter les défauts potentiels tels que les fissures, les cavités ou les ségrégations.

- Des techniciens qualifiés surveillent le processus de pompage pour s'assurer que le béton est correctement acheminé et réparti selon les spécifications du projet.

### **6.10. Problèmes rencontrés lors du pompage du béton**

Le pompage du béton peut rencontrer plusieurs problèmes qui peuvent affecter le processus de coulage et la qualité du béton final :

- Les conduites de distribution peuvent être obstruées par des agrégats trop gros, des cailloux ou des débris de ciment durcis. Cela peut entraîner un blocage partiel ou complet du flux de béton, nécessitant parfois l'arrêt de la pompe pour nettoyer ou remplacer les conduites.
- Le béton peut se séparer en ses composants individuels pendant le pompage en raison de forces de cisaillement élevées ou de différences de densité entre les matériaux constitutifs. Cela peut entraîner une distribution inégale des agrégats, du ciment et de l'eau, ce qui compromet la qualité du béton coulé.
- Le béton peut perdre de sa fluidité pendant le pompage en raison de l'évaporation de l'eau, de la chaleur générée par les pompes ou du frottement le long des conduites. Une perte excessive de fluidité peut rendre le béton difficile à pomper et à couler, nécessitant parfois l'ajout d'adjuvants pour restaurer sa consistance.
- L'eau présente dans le béton peut se séparer du mélange pendant le pompage en raison de forces de cisaillement ou de vibrations excessives. Cela peut entraîner la formation de poches d'eau à la surface du béton coulé, ce qui compromet sa résistance et son apparence esthétique.
- Si le débit de béton n'est pas contrôlé correctement pendant le pompage, des zones de bétonnage non homogène peuvent se former, avec des variations dans la densité, la résistance et la composition du béton. Cela peut entraîner des problèmes de durabilité et de performance structurelle dans les éléments en béton coulés.
- Des variations de pression dans le système de pompage peuvent se produire en raison de blocages, de changements soudains dans la viscosité du béton ou de défaillances mécaniques des équipements. Cela peut entraîner des ruptures de conduites, des fuites ou des éclaboussures de béton, mettant en danger la sécurité sur le chantier.

## 6.11. Pompage des bétons spéciaux

### a) Bétons fibrés

L'addition de fibres réduit de manière générale l'ouvrabilité du béton. Les fibres polymères diminuent, même en petites quantités (1 à 2 kg/m<sup>3</sup>), la consistance du béton. Les fibres en acier (30 à 50 kg/m<sup>3</sup>) n'ont qu'une faible influence sur la consistance du béton, mais peuvent provoquer des bourrages à l'endroit des changements de diamètre ou des coudes dans la tuyauterie. La perte de consistance due aux fibres peut être compensée par une augmentation de la pâte de ciment.

### b) Béton léger

En règle générale il est possible de pomper des bétons légers avec une masse volumique supérieure à 1600 kg/m<sup>3</sup>. Des essais préliminaires sont recommandés.

### c) Béton à air entraîné

Une teneur en air entraîné > 5 % vol peut diminuer les performances de la pompe sur de longues distances de pompage. Selon la distance et la hauteur de transport, la pression de pompage peut s'élever pour de courts moments à 150 bar, induisant une compression des pores d'air dans le béton frais. Le pompage influence non seulement la teneur et la distribution des pores d'air, mais aussi l'ouvrabilité. Le contrôle du béton frais d'un béton à air entraîné doit toujours se faire après le pompage. La perte des pores d'air par le pompage peut atteindre 0.5 à 2 % vol. et doit être compensée par un dosage corrigé de l'entraîneur d'air.

## 6.12. Aspects de sécurité lors de l'emploi des pompes à béton

Le transport et la mise en place du béton pompé comporte des risques. Pour y pallier, il faut, en particulier, vérifier les points suivants:

- Une pression plus élevée du béton pompé sur les coffrages verticaux doit être prise en compte
- Aucune ligne électrique aérienne ne traverse l'espace de travail.
- La surface de l'emplacement prévu pour la pompe est suffisamment grande pour que les stabilisateurs de la pompe à béton puissent être déployés complètement (danger de basculement)
- La capacité portante de l'emplacement de la pompe et ses accessoires est suffisante.
- La lubrification de la face interne du tuyau exige une certaine quantité de pâte de ciment.

Au moment du démarrage du pompage, cette pâte de ciment est soustraite au béton qui passe en premier par le tuyau. Pour cette raison, le pompage du béton doit être précédé de l'envoi d'une gâchée de lubrification enrichie en pâte de ciment. Les gâchées de lubrification sont de plus en plus rarement fabriquées sur le chantier, mais commandées à la centrale à béton. Pour une distance de pompage de 100 m, une gâchée de 500 litres suffit normalement de lubrification. Elle est composée de deux parts de ciment pour une part de sable et une part d'eau.

- L'emploi d'un retardateur est recommandé lorsque de longues durées d'ouvrabilité sont exigées. Une plus grande quantité de gâchée de lubrification est à choisir en fonction du diamètre des tuyaux et pour des distances de pompage plus grandes. La gâchée de lubrification (env. 0.5 m<sup>3</sup>) ne doit en aucun cas être utilisée pour des éléments porteurs et doit être éliminée correctement.
- Après avoir terminé le pompage, nettoyez soigneusement tous les équipements pour éviter l'accumulation de résidus de béton.
- Effectuez la maintenance préventive régulière de la pompe à béton pour assurer son bon fonctionnement lors des prochains projets.

### **6.13. Recommandations pour le pompage du béton**

Pour garantir un pompage rentable du béton, il faut observer les indications suivantes:

- Pour que l'opération de pompage se déroule de manière coordonnée et sans problème, un contact doit être établi suffisamment tôt entre l'entreprise de construction, l'entreprise de pompage et le fournisseur du béton.
- La fréquence des livraisons du béton et les performances de la pompe doivent être adaptées au rythme de mise en place par l'équipe de bétonnage.
- Le transport du béton jusqu'à la pompe doit être effectué par camion malaxeur afin d'éviter tout risque de ségrégation.

### **6.14. Les atouts de pompage du béton**

L'utilisation du béton pompé offre des avantages significatifs en termes de rapidité, de productivité et de qualité de la construction.

- Une mise en place rapide (selon la section de l'élément entre 30 à 150 m<sup>3</sup> /heure, normalement env. 90 m<sup>3</sup> /heure)

- Il ne nécessite pas de grue, respectivement la grue peut être occupée à d'autres travaux
- Une mise en place aussi possible en cas d'ouvrages difficilement accessibles, p. ex. des éléments couverts, des tunnels
- Une mise en place aisée pour l'équipe de bétonnage
- Un remplissage propre du coffrage
- Il permet d'opérer à de grandes distances, malgré des différences de hauteur importantes, jusqu'au lieu du bétonnage (distance de transport jusqu'à 2000 m et différence de hauteur jusqu'à 500 m)
- La mise en place continue et rapide favorise la qualité, les couches de bétonnage sont moins visibles grâce à une mise en œuvre plus rapide
- Pour un mur, il permet d'éviter de grandes hauteurs de déversement du béton par l'introduction du tuyau de pompage au fond du coffrage.

### **6.15. Domaines d'application**

Le béton pompé est largement utilisé dans l'industrie de la construction pour divers types de projets. Il est couramment utilisé dans la construction de grands bâtiments, tels que les gratte-ciel et les centres commerciaux, où le pompage du béton permet d'atteindre des hauteurs considérables de manière efficace. De plus, le béton pompé est également utilisé dans les travaux souterrains tels que les tunnels et les fondations profondes, où il est difficile d'accéder avec d'autres méthodes de coulage du béton. Ainsi, nous pouvons citer quelques ouvrages très connus pour lesquels cette technique a été utilisée:

#### **a) La tour Khaliffe à Dubai**

C'est un ouvrage record par rapport à sa hauteur et par rapport au pompage du béton. C'est une tour de plus de 800 mètres de haut (600 mètres en béton suivie d'une partie métallique de plus de 200 mètres). Elle est basée sur une superficie totale d'environ 465 000 mètres carrés. La technique de pompage sans reprise a été retenue pour la structure béton. La pression de pompage nominale est de 200 bars. La tuyauterie de diamètre 150 mm est renforcée pour résister à la pression ainsi qu'à l'abrasion. Pour atteindre la partie la plus haute de la tour, le béton doit être acheminé dans les canalisations pendant 35 minutes.



Figure 6-9: La tour

### b) La grande arche de la défense

Les méga poutres ont été coulées sur place en pompant le béton à travers un système de tuyauterie allant jusqu'à 400 m de long et 130 m de haut. Le béton était pompé avec un débit de 40m<sup>3</sup> par heure et une pression de 60 bars.



Figure 6-10: Grande arche de la Défense

### **6.16. Conclusion**

Le phénomène de pompage du béton implique la manipulation d'un matériau viscoélastique à travers un système de conduites sous pression, en tenant compte des forces de frottement, de gravité et de régulation du débit pour assurer un coulage efficace et précis sur le chantier.

Lors de la fabrication du béton pompé, il est essentiel de sélectionner des matériaux de haute qualité et de contrôler précisément les proportions des composants pour garantir la performance optimale du mélange lors du pompage et du coulage. Des essais préliminaires et des ajustements peuvent être nécessaires pour adapter le mélange aux exigences spécifiques du projet et aux conditions de pompage.

Pour minimiser les problèmes rencontrés lors du pompage, une planification adéquate du processus de pompage, une sélection appropriée des équipements et des matériaux, ainsi qu'une surveillance continue pendant le pompage sont essentielles. De plus, une formation adéquate du personnel chargé du pompage du béton peut contribuer à identifier et à résoudre rapidement les problèmes potentiels sur le chantier.

En comprenant les avantages et les limitations du béton pompé, nous sommes mieux équipés pour prendre des décisions éclairées lors de la planification et de l'exécution de projets de construction.

## Références

### Chapitre 1 : béton de masse

<http://www.dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI 207.1R-05 G>, consulté le 11/09/2023.

[http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2071r\\_96.pdf](http://civilwares.free.fr/ACI/MCP04/2071r_96.pdf), consulté le 11/09/2023

[Béton de masse | Bétons Feidt \(betonsfeidt.lu\)](#), consulté le 12/01/2023.

<https://www.becosan.com/fr/types-de-beton/>, consulté le 13/03/2023.

[What is Mass Concrete? - The Constructor](#), consulté le 11/03/2023.

<https://constructionor.com/mass-concrete/> consulté le 13/03/2023.

[Mass Concrete Placements: What you need to know | AET \(teamaet.com\)](#) consulté le 13/03/2023.

[What Is Mass Concrete | Properties of Mass Concrete | Advantage of Mass Concrete | Disadvantage of Mass Concrete |How Much Mass Density of Concrete \(civiljungle.com\)](#) consulté le 12/09/2022.

[Mass Concrete \(cement.org\)](#), consulté le 13/05/2023.

[Mass Concrete - design and construction aspects - Structural Guide](#), consulté le 13/05/2023.

[Mass Concrete - What is Mass Concrete & Where It Is Used \(dailycivil.com\)](#), consulté le 13/05/2023.

<https://civilengpro.com/what-is-mass-concrete/> , consulté le 12/06/2022.

### Chapitre 2 : béton des chaussées

Bouaoune, W. & Boureghdad Y. (2022). Etude du comportement d'un béton compacté au rouleau (BCR) à base des agrégats recyclés traités par la poudre de verre. These de doctorat LMD. Université de Blida 1: <https://dspace.univ-bba.dz:443/xmlui/handle/123456789/2540>

A. Bezzar, cours Route : GV 842 Dimensionnement des chaussées. Université ABOU-BEKR BELKAID, 2019-2020.

Abdelghafour, S. (2013). Formulation et étude d'un béton de route à base de matériaux locaux.Mémoire de magister. Université Saad dahlab de Blida. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/5675>.

Faubert, J. P., Gagné, R., Yahia, A., & Fournier, B. (2013). Valorisation de particules fines dans les bétons compactés au rouleau et les bétons moulés à sec. Mémoire de maîtrise en génie civil, Sherbrooke. Université de Sherbrooke.

Gauthier, P., Marchand, J., Boisvert, L., Ouellet, E., Pigeon, M. (2000). Conception, formulation, production et mise en œuvre de revêtements en béton compacté au rouleau, Formation continue GCI-A2455, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, Département de génie civil, Université Laval.

Meddah, A., (2015). Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques mémoire de Magister en Génie Civil. Université de M'sila.

Les chaussées composites :

<https://www.infociments.fr/sites/default/files/articles/pdf/15.%20Chauss%C3%A9es%20composites%20-%20JA%20PDF.pdf>, consulté le 03/12/2022.

Conception d'une dalle de chaussée en Béton Armé Continu (BAC) avec des armatures en PRFV sur l'autoroute 40 Est (Montréal) (123dok.net) , consulté le 03/12/2022.

Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées métropolitaines version mars 2017:

[https://www.grandlyon.com/fileadmin/user\\_upload/media/pdf/voirie/20180619\\_g1\\_voirie\\_guide\\_conception\\_structures\\_de\\_chaussees.pdf](https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/20180619_g1_voirie_guide_conception_structures_de_chaussees.pdf), consulté le 03/12/2022.

Chaussées en béton : Guide technique -

[doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/15887/chaussees-en-beton-guide-technique?\\_lg=fr-FR](http://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/15887/chaussees-en-beton-guide-technique?_lg=fr-FR) , consulté le 03/12/2022.

Conception d'une dalle de chaussée en Béton Armé Continu (BAC) avec des armatures en PRFV sur l'autoroute 40 Est (Montréal) (123dok.net) , consulté le 03/12/2022.

Chaussées composites en béton armé continu sur grave-bitume: <https://www.editions-rgra.com/revue/959/amenagement-urbain/chaussees-composites-en-beton-arme-continu-sur-grave-bitume>, consulté le 08/01/2023.

Les différents types de structures routières :

<https://www.specbea.com/wpcontent/uploads/2019/05/Voirie-SESSION-3.2.pdf> , consulté le 08/01/2023.

Béton compacté au rouleau pour un investissement durable:

<https://www.betonprovincial.com/bcr>, consulté le 08/01/2023.

Béton compacté au rouleau pour un investissement durable :

<https://www.betonprovincial.com/bcr> , consulté le 08/01/2023.

Le béton compacté routier (BCR) fait peau neuve:

<https://www.infociments.fr/route/le-beton-compacte-routier-bcr-fait-peau-neuve>, consulté le 08/01/2023.

### **Chapitre 3 : Bétons prêt à l'emploi**

Composition béton - Formulation, fabrication et mise en œuvre des bétons | Infociments, consulté le 11/12/2023.

Le béton prêt à l'emploi | Infociments, consulté le 11/12/2023.

Béton Prêt à l'Emploi (BPE) - Unicem, consulté le 11/12/2023.

Béton prêt à l'emploi - types, avantages et inconvénients | Mega Centrales à Béton (megacentralesbeton.com) , consulté le 11/12/2023.

Le béton prêt à l'emploi - [fehrgroup.com](http://fehrgroup.com), consulté le 17/12/2023.

Le béton prêt à l'emploi - GuideBeton.com, consulté le 17/12/2023.

Béton prêt à l'emploi - allobeton.com, consulté le 23/12/2023.

Béton prêt à l'emploi : coûts, mise en œuvre et conseils. - Affaire Matériaux (affairematériaux.fr), consulté le 23/12/2023.

Béton Prêt à l'emploi : utilisation, avantages, dosage, composition, tuto vidéo (calcul-beton.fr), consulté le 23/12/2023.

Tout savoir sur le béton prêt à l'emploi - Prix - Avantages - Beton Expert, consulté le 11/12/2023.

## **Chapitre 4 : Bétons réfractaires**

Collignon, B. (2009). Séchage des bétons réfractaires : expérimentation, modélisation et influence d'un ajout de fibres polymère (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).

d'Elia, R. (2014). Comportement thermomécanique et en ablation d'un béton réfractaire à base de SiC pour applications en propulsion hybride. Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).

Douche, Y. (2005). Étude de la résistance à l'impact mécanique des bétons réfractaires aluminosiliceux. Doctoral dissertation. École Polytechnique de Montréal.

Bétons réfractaires - denses ou isolants - Prosiref, consulté le 11/09/2023.

Béton réfractaire: la composition du béton résistant à la chaleur et gost, faites-le vous-même, consulté le 11/09/2023. Qu'est-ce que c'est? Conditions techniques et proportions, ciment pour cela (construire-loger.info), consulté le 11/09/2023.

Conseils de mise en oeuvre des bétons réfractaires (coeurdefoyer.fr), consulté le 15/09/2023.

Les bétons réfractaires - Le guide de la Maçonnerie (bilp.fr), consulté le 15/09/2023.

## **Chapitre 5 : Bétons projetés**

Les bétons projetés : définition, techniques de projection, formulation, utilisations, avantages et inconvénients | Infociments, consulté le 11/10/2023.

Mise en œuvre des bétons projetés | Infociments, consulté le 12/10/2023.

Béton projeté - Cours BTP (btp-cours.com), consulté le 12/10/2023.

[Comment Appliquer Du Béton Projeté ? » Guide Btp \(guide-btp.com\)](#), consulté le 12/10/2023.

[PROJECTION DES MORTIERS, BETONS ET PLATRES - PDF Free Download \(docplayer.fr\)](#) consulté le 19/10/2023.

[Comité Technique Asquapro. Fascicules 4. Formulation des bétons projetés. Version PDF Téléchargement Gratuit \(docplayer.fr\)](#) , consulté le 19/10/2023.

Tout savoir sur le béton projeté :<https://www.betonix.be/beton-projete/>

Armengaud, J. (2016). Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

Armengaud, J. (2016). Optimisation des propriétés des bétons projetés par voie sèche (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

Benaissa, I. (2015). béton de sable fibré projeté pour panneau 3d (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

Royer, J. M. (2013). Étude de la mise en place et compaction du béton projeté (Doctoral dissertation, Université Laval).

Siccardi, P. (2018). Influence de la lance en projection de béton : homogénéité et rebond. Doctoral dissertation, Université Laval.

## **Chapitre 6 : Bétons pompés**

Kaplan, D. (1999). Pompage des bétons. Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Chapdelaine, F. (2007). Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton. Doctoral dissertation, Université Laval.

Chapdelaine, F. (2007). Étude fondamentale et pratique sur le pompage du béton. Doctoral dissertation, Université Laval.

Le, H. D. (2014). Etude de l'effet de la couche limite sur les profils de vitesses du béton pompé. Doctoral dissertation, Université de Cergy Pontoise; Universiteit Gent.

[Les bétons pompés | Kurt Hermann - Academia.edu](#), consulté le 03/12/2023.

Tout savoir sur la pompe à béton. Comment utiliser?<https://www.artisanbeton.fr/pompe-beton.html>, consulté le 13/09/2023.

<https://www.infociments.fr/pompage-des-betons>, consulté le 13/09/2023.