



UNIVERSITÉ DE  
**SHERBROOKE**

Faculté de Génie

# **GCI 340**

## **Technologie du béton**

**Kamal H. Khayat**

Professeur

Département de génie civil

**En collaboration avec**

**Ammar Yahia**

Professeur agrégé

Département de génie civil

**Automne 2011**

# **Table des matières**

## **CHAPITRE 1 : Caractéristiques fondamentales du béton**

- Partie 1 – Béton frais
- Partie 2 – Béton durcis
- Partie 3 – Durabilité

## **CHAPITRE 2 : Fabrication, composition et hydratation du ciment portland**

- Partie 1 – Fabrication du ciment Portland
- Partie 2 – Hydratation du ciment Portland et structure de la pâte hydratée

### **Annexe - Les composantes d'une matrice cimentaire (Rappel et interaction)**

## **CHAPITRE 3 : Les granulats à béton**

## **CHAPITRE 4 : Adjuvants (ajouts chimiques)**

- Partie 1 – Adjuvants (ajouts chimiques)
- Partie 2 – Adjuvants (l'emploi des fluidifiants dans les bétons à haute performance)

## **CHAPITRE 5 : Formulation des bétons conventionnels**

## **CHAPITRE 6 : Propriétés mécaniques du béton**

## **CHAPITRE 7 : Béton à hautes performances (BHP)**

## **CHAPITRE 8 : Durabilité du béton**

- Partie 1 – Porosité et perméabilité
- Partie 2 – Durabilité aux cycles de gel-dégel
- Partie 3 – Réaction alcalis-granulats

## **CHAPITRE 9 : Bétons spéciaux**

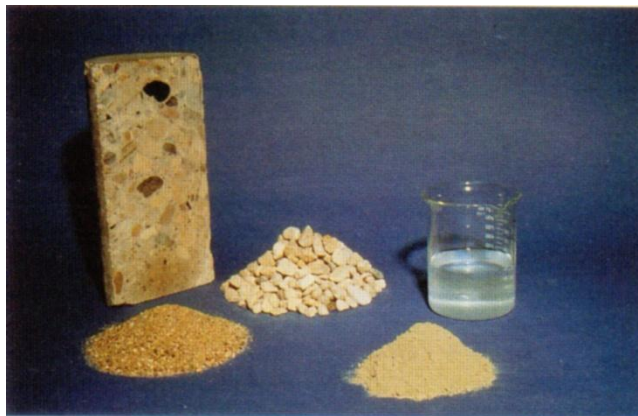
- Partie 1 – Les bétons autonivelants
- Partie 2 – Béton de masse
- Partie 3 – Béton léger

# CHAPITRE 1

## Caractéristiques fondamentales du béton

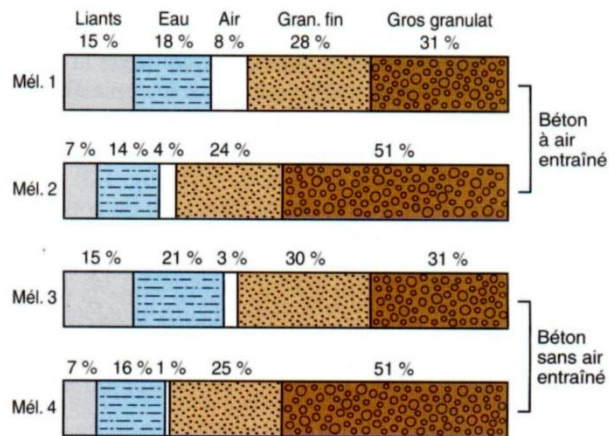
Le béton de ciment est un mélange de deux constituants : le granulat et la pâte ciment. Le granulat se compose des granulats fins (sable) et des gros granulats (gravier). Les granulats fins sont des sables naturels ou manufacturés dont la taille des particules va jusqu'à 5 mm (parfois 10 mm). Les gros granulats sont constitués de particules retenues sur le tamis 1,25 mm et pouvant aller jusqu'à 150 mm (bétons de masse et autres). La taille maximale du granulat couramment utilisée dans le béton conventionnel est de 20 mm. Dans le béton de masse, les tailles maximales du granulat couramment utilisées sont de 40 ou 80 mm.

La pâte se compose de ciment (avec ou sans ajouts cimentaires), d'eau et d'air (air emprisonné ou entraîné). La pâte constitue environ 25% à 40% du volume total du béton. Dans les bétons modernes, la pâte peut contenir également des adjuvants chimiques utilisés pour améliorer/contrôler certaines propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.



**Fig.1. Ingrédients de béton (dosage et contrôle)**

Il est important de mentionner que les granulats occupent 60 à 75% du volume total. De part leur volume important, la sélection des granulats joue un rôle important sur les propriétés et la durabilité du béton. Composés de particules suffisamment fortes et résistantes pour les conditions auxquelles ils seront exposés, ils ne doivent pas contenir de matières susceptibles de causer la détérioration du béton. Une granulométrie continue est souhaitable pour l'utilisation optimale de la pâte.



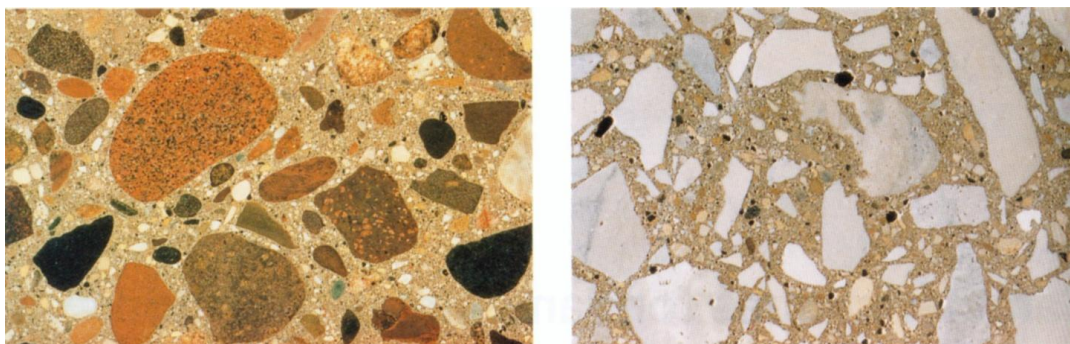
**Fig. 2 - Proportions des composants du béton (dosage et contrôle)**  
*Les mélanges 1 et 3 sont des mélanges riches contenant du petit granulat;*  
*les mélanges 2 et 4, des mélanges pauvres contenant du gros granulat.*

## 1. Rôle du rapport E/C

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat ainsi que de la qualité de l'adhérence qui se développent entre eux. Dans un béton bien formulé, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont également remplis pour obtenir une matrice compacte.

La qualité du béton durci dépend en grande partie de la quantité d'eau dans le mélange (ou du rapport Eau/Ciment). La réduction de la quantité d'eau présente les avantages suivants :

- Amélioration des propriétés mécaniques (résistance en compression, la résistance en flexion, résistance en traction),
- Réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption,
- Diminution du ressuage interne et externe, donc amélioration de l'adhérence entre le béton et barres d'armature,
- Amélioration de la zone de transition pâte-granulat.



**Fig.3 - Coupe dans un béton durci constitué (à gauche) de gravier siliceux roulé et (à droite) et de calcaire concassé (dosage en contrôle)**

La réduction de la quantité d'eau de gâchage donne des mélanges plus fermes, mais on peut assurer une bonne mise en place du béton grâce à l'application d'une

vibration appropriée. La consolidation du béton par la vibration permet d'améliorer la qualité du béton durci. Il est également possible de modifier les propriétés du béton plastique avec des adjuvants pendant le malaxage. Les adjuvants dans le béton permettent notamment de 1) contrôler le temps de prise du béton pour faciliter sa mise en place selon les conditions de chantier, 2) améliorer sa maniabilité tout en réduisant la quantité d'eau de gâchage, 3) entraîner de l'air dans le béton, etc.

## **2. Propriétés du béton à l'état frais**

Le béton frais est formulé pour avoir un niveau de maniabilité (plasticité) donné pour pouvoir le façonner et le mettre en place selon les moyens de mise en œuvre disponibles et les conditions environnementales (par temps chaud ou froid). Dans un mélange de béton, les granulats (fins et gros) sont enrobés et uniformément maintenus en suspension. Le béton est formulé, mélangé, transporté et mis en place sans induire une séparation des particules : on parle alors d'une bonne stabilité du mélange (maintient en suspension des particules solides). Quant le béton durci, il devient ainsi un matériau homogène et développe des propriétés uniformes.

### **2.1 Malaxage**

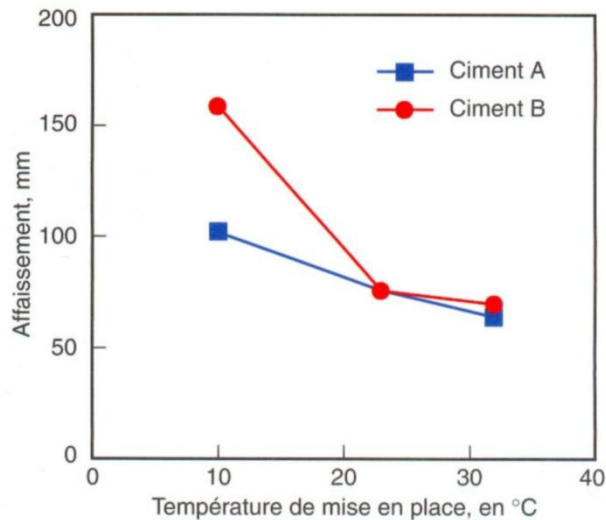
Le malaxage du béton est une étape importante pour assurer un mélange homogène. La séquence d'introduction des ingrédients dans le malaxeur, le temps de malaxage, l'énergie du malaxage (nombre de tours/min), etc. sont autant de paramètres qui affectent la qualité du malaxage. Les autres facteurs qui affectent le malaxage sont le rapport entre le volume de la gâché, type de malaxeur et la taille du tambour, la configuration de palettes du malaxeur.

### **2.2 Maniabilité**

La maniabilité du béton peut être décrite comme la facilité de mise en place, de consolidation et de finition tout en assurant une bonne résistance ségrégation. Le degré de maniabilité nécessaire à une bonne mise en place varie selon le type de consolidation, la géométrie et configuration (densité du renforcement) de l'élément à couler, la méthode de mise en place (pompage, trémie, convoyeur, etc.) et le type de béton. Des types de mise en place différents exigent des niveaux différents de maniabilité.

Les facteurs qui influent sur la maniabilité du béton sont : la méthode et la durée de transport, le type et la teneur en liant, l'affaissement initial du béton, les caractéristiques des granulats (fin et gros, telles que la granulométrie, forme, type de surface des grains), le pourcentage d'air entraîné, la teneur en eau, la température du béton et celle de l'air ambiant, et enfin la présence des adjuvants.

Une distribution uniforme des granulats et la présence d'air entraîné contribuent de façon importante à réduire la ségrégation et à améliorer la maniabilité. La figure 4 illustre l'effet de la température de mise en place sur l'affaissement des mélanges de béton et leur maniabilité potentielle.



**Fig. 4 - Effet de la température de mise en place sur l'affaissement (dosage et contrôle)**

Les propriétés qui ont un lien avec l'ouvrabilité sont principalement la résistance à la ségrégation et le ressuage, la pompabilité et la facilité de finition. Un béton à affaissement faible a une consistance ferme. Si la consistance est trop élevée (béton raide), le béton est difficile à mettre en place et à consolider. Toutefois, on ne doit pas en conclure qu'un mélange plus fluide est nécessairement plus maniable. Si le mélange est trop fluide, il peut se produire de la ségrégation et se former des nids de cailloux.

### 2.3 Ressuage, ségrégation et tassement

Le ressuage se manifeste par la formation d'une couche d'eau sur le béton fraîchement mis en place, attribuable au tassement des matières solides (liants et granulats) et à la migration simultanée de l'eau vers le haut (Fig. 5). Le ressuage est un phénomène normal, et il ne devrait pas diminuer la qualité d'un béton dont la mise en place et la finition ont été bien exécutées. Un peu de ressuage peut même présenter des avantages et contribuer à réduire l'apparition de fissures de retrait plastique.



**Fig.5 - Eau de ressuage sur la surface d'une dalle de béton fraîchement mise en place (dosage et contrôle)**

Un ressuage excessif accroît le rapport eau/ciment à la face supérieure. Si la finition

de la surface est réalisée en présence de cette eau de ressuage, ceci peut entraîner à la formation d'une couche de béton de faible durabilité. Après l'évaporation de l'eau de ressuage et le durcissement du béton, le niveau de la surface se sera légèrement abaissé. Cette réduction de la hauteur du béton, qui survient entre la mise en place et la prise initiale, s'appelle le retrait de tassement.

Le taux de ressuage et la capacité de ressuage (le tassement total par unité de hauteur initiale du béton) augmentent avec la teneur initiale en eau et la hauteur du béton. Le ressuage peut être réduit :

- en utilisant des granulats ayant une granulométrie appropriée,
- en utilisant certains adjuvants chimiques (agent de viscosité),
- en utilisant de l'air entraîné, des ajouts cimentaires et des ciments plus fins.

Les bétons utilisés pour combler des vides, fournir un appui ou assurer l'étanchéité doivent avoir un faible potentiel de ressuage, pour éviter la formation de poches d'eau.

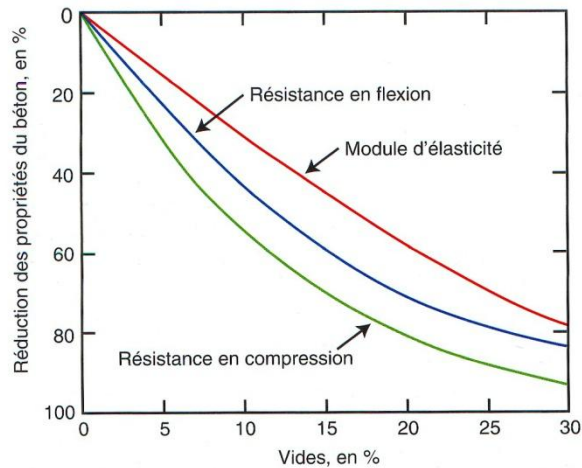
## 2.4 Consolidation

L'application de la vibration à un béton plastique (frais) met en mouvement ses particules, réduisant la friction entre elles et donnant au mélange la fluidité d'un liquide épais. Avec une consolidation appropriée, on peut utiliser des mélanges de béton plus épais et plus raides, contribuant ainsi à améliorer la qualité et à réduire le coût. Une mauvaise consolidation entraîne la production d'un béton poreux ayant une faible résistance (Fig. 6) et une durabilité réduite (Fig. 7).

La vibration permet l'utilisation d'un mélange plus ferme, à proportion plus grande de gros granulats et plus faible de granulats fins. Plus la taille maximum du gros granulat est grande (pour granulométrie bien étalée) plus le volume à remplir de pâte et la superficie à couvrir diminuent, donc la demande en pâte diminue (pour une fluidité donnée). Une bonne granulométrie facilite la consolidation et la mise en place.



**Fig. 6. Une bonne consolidation (à gauche) est nécessaire si l'on veut obtenir un béton dense et durable. Une mauvaise consolidation (à droite) peut entraîner la corrosion précoce de l'acier d'armature et une mauvaise durabilité (dosage et contrôle)**



**Fig. 7 - Effet des vides dans le béton (attribuables à un manque de consolidation) sur le module d'élasticité, la résistance en compression et la résistance en flexion (dosage et contrôle)**

La vibration mécanique procure de nombreux avantages. Grâce aux vibrateurs, il est possible de mettre économiquement en place des mélanges qui, dans de nombreux cas, pourraient difficilement être consolidés à la main.

## 2.5 Hydratation et temps de prise

La réaction chimique entre le ciment et l'eau est appelée hydratation. C'est une réaction exothermique (i.e. accompagnée d'un dégagement de chaleur). Il peut être utile, pour la planification des travaux, de connaître la quantité de chaleur dégagée à mesure que les liants s'hydratent. En hiver, la chaleur ainsi produite contribue à protéger le béton contre le gel. Cette chaleur peut cependant être nuisible dans le cas des structures massives comme les barrages car elle risque de produire des différentiels de température qui peuvent causer de la fissuration.

Le ciment portland n'est pas un composé chimique simple; c'est un mélange composé. Les 4 composés, silicate tricalcique, le silicate bicalcique, l'aluminate tricalcique et l'aluminoferrite tétrachorique représentent 90 % ou plus de la masse du ciment portland. À ces composants s'ajoutent plusieurs autres éléments qui jouent un rôle important dans le processus d'hydratation.

Le diamètre moyen d'une particule type de ciment est d'environ 15  $\mu\text{m}$ . Si toutes les particules du ciment étaient de taille moyenne, un kilogramme de ciment portland en contiendrait approximativement 300 milliards; en fait, comme la taille des particules varie considérablement, on en compte quelque 16 000 milliards. Dans un kilogramme de ciment portland, les particules ont une surface spécifique d'environ 400  $\text{m}^2$ .

Les deux silicates de calcium, qui constituent à peu près 75 % de la masse du ciment portland, réagissent avec l'eau pour former deux nouveaux composés : l'hydroxyde de calcium ou portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et le silicate de calcium hydraté (CSH). Ce dernier constitue de loin le plus important agent liant du béton. Les propriétés techniques du béton (prise et durcissement, résistance et stabilité volumétrique) tiennent principalement à la présence du silicate de calcium hydraté, qui constitue l'élément essentiel du béton. La composition chimique du silicate de

calcium hydraté est quelque peu variable, mais comporte de la chaux (CaO) et de la silice (SiO<sub>2</sub>) dans un rapport de l'ordre de 3 à 2. La surface spécifique du silicate de calcium hydraté est d'environ 300 m<sup>2</sup> par gramme.

Pendant le durcissement du béton, son volume brut demeure sensiblement le même, mais le béton durci contient des pores remplis d'eau et d'air. Ce sont les parties solides de la pâte, et notamment le silicate de calcium hydraté et ses phases cristallines qui contribuent à la résistance du béton. Moins la pâte est poreuse, plus le béton est résistant. Il est donc important, au moment de malaxer le béton, de ne pas lui ajouter plus d'eau qu'il est absolument nécessaire pour le rendre plastique et maniable. Il est par ailleurs important de connaître le taux de réaction entre les liants et l'eau, car c'est de lui que dépend le temps de durcissement. La réaction initiale doit être suffisamment lente pour permettre le transport et la mise en place du béton. Une fois le béton mis en place et fini, toutefois, il est préférable qu'il durcisse rapidement. Le gypse ajouté pendant le broyage du clinker sert à régulariser le taux initial de prise du ciment portland. Les autres facteurs qui agissent sur le taux d'hydratation sont la finesse des particules de ciment, la quantité d'eau ajoutée et la température des matériaux au moment du malaxage.

## **2.6 Retrait plastique**

Ce type de retrait commence dès que la surface exposée commence à sécher. Le séchage d'eau dans les pores capillaires dans le béton près de la surface exposée cause une diminution du volume du béton plastique. Si cette diminution survient à la fin de la prise du béton (la pâte devient beaucoup moins déformable), le séchage entraîne des contraintes de traction qui peuvent entraîner de la fissuration du béton au jeune âge (ayant une faible résistance à la traction). Une fissuration superficielle de la surface survient si le taux d'évaporation est supérieur au taux de ressuage à la surface. Ceci peut ainsi cause une perte de durabilité et résistance du béton.

La longueur des fissures varient de 50 à 1000 mm et sont généralement irrégulièrement espacées (souvent de 50 à 700 mm). L'épaisseur et profondeur des fissures sont d'habitude entre 1 et 50 mm.

Les facteurs qui augmentent le risque de fissuration sont :

- Une évaporation importante (vent, température ambiante, humidité, méthode cure peu efficace)
- Le ressuage décroît (béton à air entraîné, finesse de ciment, FS, AC, teneur en C<sub>3</sub>A élevée et alcalis)
- Prise lente du béton.

La norme CSA A23.1 exige de prendre des mesures suivantes si le taux d'évaporation dépasse 1,0 kg/m<sup>2</sup> par heure pour éliminer le risque de fissuration de retrait plastique.

### 3. Propriétés du béton à l'état durci

#### 3.1 Cure

Le béton continue à durcir tant qu'il contient des liants non hydratés, à condition qu'il demeure humide ou que son humidité relative soit supérieure à environ 80 % (Powers 1948) et que sa température reste favorable et qu'il y ait suffisamment d'espace pour que se forment des produits d'hydratation. Lorsque l'humidité relative du béton descend en dessous de 80 % ou que sa température tombe sous le point de congélation, l'hydratation et l'accroissement de la résistance s'arrêtent presque totalement. La figure 8 représente la relation existant entre l'accroissement de la résistance et la cure humide; la figure 9 illustre la relation existant entre la température de cure et l'accroissement de la résistance.

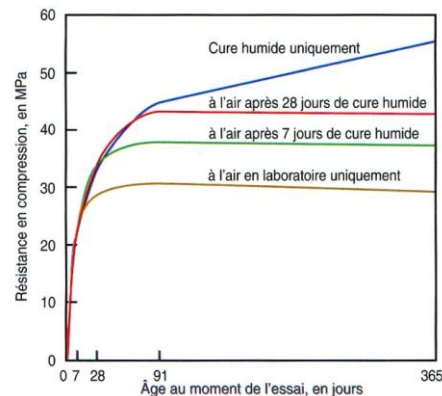


Fig. 8 - La résistance mécanique du béton (dosage et contrôle)

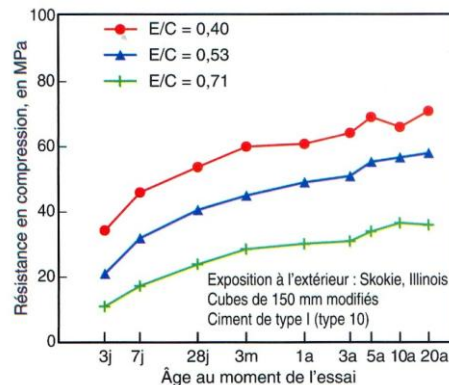


Fig. 9 - Effet de la température de mise en place et de cure sur le développement de la résistance

Si l'on sature le béton de nouveau après une période de séchage, l'hydratation reprend et la résistance du béton continue d'augmenter. Il est toutefois préférable que la maturation humide du béton se fasse de façon continue, depuis la mise en place jusqu'au moment où la qualité voulue est atteinte, car il est difficile de restaurer le béton.