

Technologie du béton – GCI 340

Ammar Yahia, ing., Ph.D.
Génie civil

Automne 2011

CHAPITRE 5 : Dosage des bétons conventionnels

Plan:

- Caractéristiques requises – frais et durci!
- Dosage d'un mélange et le devis technique
- Compréhension des principes de base du mélange
- Contrôle statistique
- Étude de cas!

CHAPITRE 5 : Dosage des bétons conventionnels

1. Établissement des caractéristique souhaitées du béton
2. Choix de proportions des matériaux pour produire un béton économique et ayant les propriétés requises!
3. Les méthodes de formulation ont beaucoup évolué
4. Méthode des volumes absolus – précise

CHAPITRE 5 : Dosage des bétons conventionnels

5. Un mélange de béton peut être dosé en se basant sur des données statistiques (expériences sur chantier) ou sur des mélanges d'essais!!

CHAPITRE 5 : Dosage des bétons conventionnels

Un mélange bien dosé doit posséder les caractéristiques:

- Une maniabilité adaptée aux conditions de mise en place et géométrie de l'élément
- Durabilité, résistance et apparence uniforme du béton
- Économie!

Caractéristiques du mélange

- Caractéristiques en fonction:
 - * de l'emploi auquel le béton est destiné
 - * les conditions d'exposition
 - * Les dimensions et la forme des éléments à couler
 - * fonctionnalité de la structure – kcl, flexion, etc.
- Calcul du dosage de béton à partir des données de chantier ou de laboratoire

Caractéristiques du mélange

- Les caractéristiques souhaitables du béton dépendent de la qualité de la pâte:
 - choix du rapport E/C – besoin de durabilité et résistance!
 - éviter de compliquer le mélange!!
 - un nombre excessif d'ingrédients = contrôle difficile
 - il ne faut pas non plus oublier les nouvelles technologie!! Ex. SP!

Étapes de calcul:

Étape A:

- Choix d'affaïssement – type de construction, mise en place, etc.
- Choix de la dimension max des GG – dimension des coffrages, disposition des armatures
- Choix du E/L – exigence de la résistance
 - durabilité – gel-dégel, écaillage, sulfate, eau de mer

Étapes de calcul:

Étape A:

- Détermination de la quantité d'eau approximative – fonction d'affaissement et de $\phi_{\max}$ des GG
- Calcul de la teneur en ciment (E/L et E sont connues)
- Choix de la teneur en air – conditions d'expositions et $\phi_{\max}$
- Détermination de la quantité des GG en SSS – fonction du mf du sable et du $\phi_{\max}$

Étapes de calcul:

Étape A:

- Déterminer la masse du sable -- méthode des volumes absolus

Étapes de calcul:

Choix de l'affaissement

- Maniabilité (ou ouvrabilité), la consistance et la plasticité doivent toujours convenir aux conditions de chantier
- Ouvrabilité caractérise la facilité ou difficulté de mise en place, de consolidation et de finition.
- La consistance est l'aptitude à l'écoulement du béton
- La plasticité = à quel point le béton est facile à mouler!

Étapes de calcul:

Choix de l'affaissement

- Exemple: plus de granulats ou moins d'eau dans le béton – béton raide!
- Essais d'affaissement permet de mesurer la consistance du béton
- Affaissement ne doit pas être utilisé pour comparer deux mélanges ayant des formulations différentes!
- Variation de l'affaissement = changement de la maniabilité du béton!
- Causes: eau, malaxage, les proportions du mélange, le temps de l'essai, la mesure!!

Étapes de calcul:

Choix de l'affaissement

- Affaissement est généralement spécifié dans les devis soit comme une plage (ex. de 50 à 100 mm) ou comme un maximum à respecter
- Tolérances CSA A23.1 (ASTM C93):
 - * Affaissement spécifié de moins de 80 mm – la variation permise est ± 20 mm.
 - * Affaissement entre 80 et 170 -- ± 30 mm
 - * Affaissement > 180 mm -- ± 40 mm
- Si aucun affaissement n'a été spécifié – valeurs recommandées

Affaissements recommandés (Tableau 9.6, p.156)

Type d'ouvrage	Affaissement (mm)	
	Maximum*	Minimum
Fondations, murs et semelles renforcés	75	25
Semelles, caissons et murs non armés	75	25
Poutres et murs renforcés	100	25
Colonnes de bâtiment	100	25
Chaussées et dalles	75	25
Éléments de masse	75	25

* Peut être augmenté de 25 mm pour une consolidation manuelle (pilonnage)

L'utilisation de superplastifiants peut permettre l'obtention d'affaissements plus élevés.

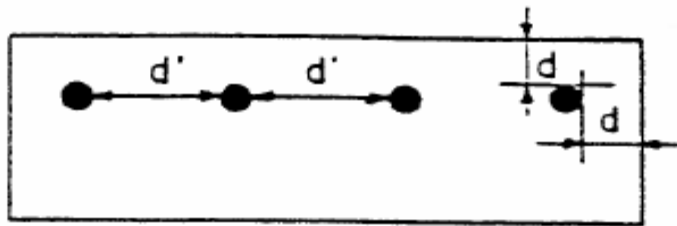
Adapté de ACI 211.1.

Étapes de calcul:

Choix de $\phi_{\max}$ des GG

- La grosseur maximale utilisable dépend à la fois des dimensions et de la forme de l'élément à couler et de la disposition des armatures et de l'épaisseur des dalles
- La granulométrie influence aussi l'ouvrabilité

1) D'après la disposition des armatures



$$\emptyset \geq \frac{3d}{4}$$

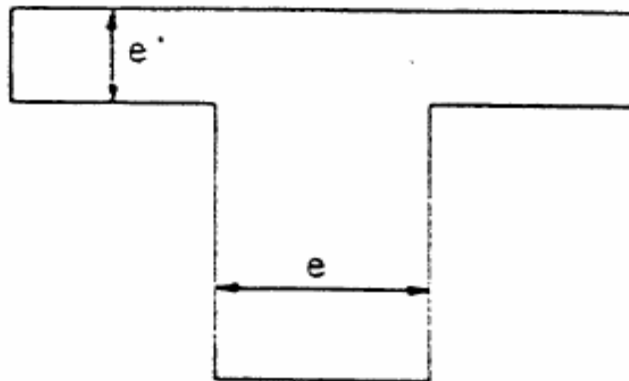
d d'acier d'armature exposés à l'air de mer:
min. de: 6 mm

$$\emptyset \geq \frac{3d'}{4}$$

2 fois d_b

2 fois d_{mer}

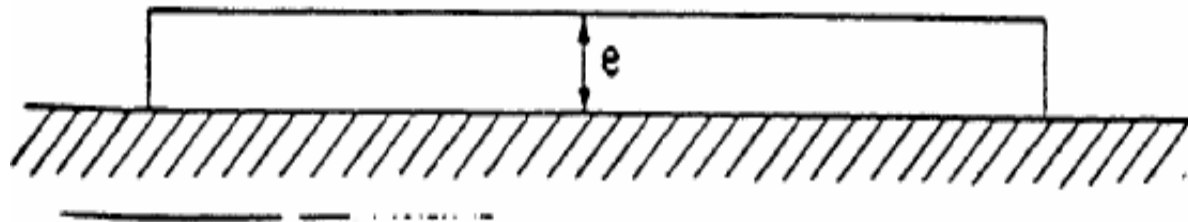
2) D'après les épaisseurs des membrures



$$\emptyset \geq \frac{e}{5}$$

$$\emptyset \geq \frac{e'}{5}$$

3) Dalle sans armature reposant sur le sol



$$\emptyset \leq \frac{e}{3}$$

TABEAU A – CHOIX DU DIAMETRE MAXIMUM " $\phi_{\max}$ " DU GROS GRANULAT

Étapes de calcul:

Choix du rapport E/L

- Résistance est inversement proportionnelle au rapport E/L: dans un béton bien compacté fabriqué avec des granulats sains et propres, la résistance et les autres propriétés, sont, dans des conditions de chantier données, déterminées par la quantité d'eau de gâchage par unité de ciment (Abrams, 1918).
- Pour un $E/L = \text{constant}$: la résistance mécanique peut varier:
 1. GG (grosseur, teneur, texture, etc.
 2. Type, dosage de ciment

Étapes de calcul:

Choix du rapport E/L

3. Teneur en air
4. présence d'adjuvants
5. maturation du béton.

Étapes de calcul:

Choix du rapport E/L – résistance

- Résistance à la compression (à 28 j) stipulée est celle qui doit être égale ou supérieur à la moyenne de trois essais consécutifs
- Aucun essai ne doit être inférieure de plus de 3,5 MPA à la résistance exigée
- La résistance moyenne devra être égale à la résistance spécifiée, majorée d'une certaine valeur pour tenir compte des variations des matériaux, malaxage, transport, mise en place, fabrication, maturation, etc.

Étapes de calcul:

Choix du rapport E/L

- Si la durabilité n'est pas un facteur important – E/L doit être choisi pour avoir la résistance désirée
- Il faut alors établir sur des conditions de chantier suffisantes ou des mélanges d'essais fabriqués avec les mêmes matériaux, même E/L – relation entre résistance et E/L
- Sinon (absence d'autres données – Figure ou Tableau

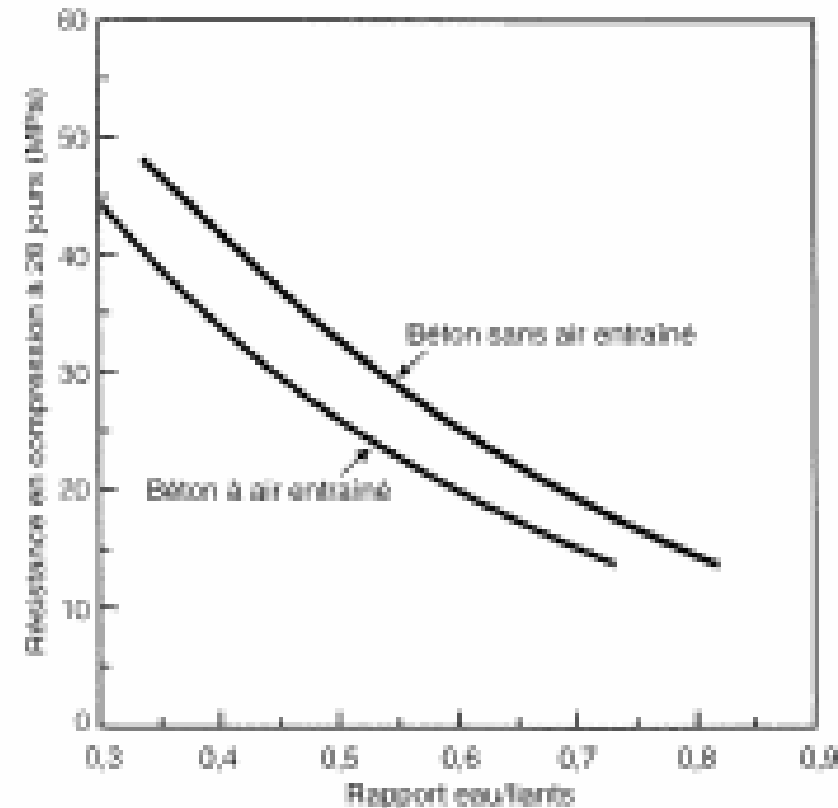
Tableau 9.3, p.153)

Résistance en compression à 28 jours (MPa)	Rapport eau/ciments (en masse)	
	Béton sans air entraîné	Béton à air entraîné
45	0,38	0,30
40	0,42	0,34
35	0,47	0,38
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

La résistance est établie sur des cylindres mûris à l'humidité ps 28 jours, conformément à CSA A23.2-9C (ASTM C 31).

La relation suppose une grosseur nominale maximale des gr de 20 mm à 28 ans.

Adapté de ACI 211.1 et ACI 211.3.



Étapes de calcul:

Choix du rapport E/L

- Si la durabilité est un facteur important – E/L doit correspondre à la plus petite valeur requise pour satisfaire aux conditions d'expositions prévues

Classe d'exposition	Degré d'exposition	Sulfates (SO_4) solubles à l'eau dans un échantillon de sol (%)	Sulfates (SO_4) dans un échantillon d'eau souterrain (mg/L)	Résistance minimale spécifiée en compression à 56 jours (MPa) +	Rapport maximum eau/liants ‡	Catégorie de teneur en air ▲	Type de liants à employer***††
S-1	Très sévère	Plus de 2,0	Plus de 10 000	35	0,40	2	50
S-2	Sévère	0,20 – 2,0	1500 – 10 000	32	0,45	2	50
S-3	Moderé	0,10 – 0,20	150 – 1500	30	0,50	2	20E±, 40 ou 50E

* Pour une exposition à l'eau de mer se référer à CSA A23.1, Clause 15.

+ Quand des ajouts cimentaires sont utilisés, le maître d'œuvre peut spécifier d'autres durées pour les essais.

‡ Le maître d'œuvre doit spécifier la résistance en compression minimale à 28 jours.

*** Quand des combinaisons de ciment portland et d'ajouts cimentaires sont utilisées, elles doivent être testées pour prouver que les bétons sont résistants aux conditions d'exposition et satisfont les exigences du propriétaire.

▲ Pour des dalles sur sol intérieures avec une finition à la truelle d'acier, sujettes aux attaques de sulfates mais non au gel-dégel, l'entraînement d'air n'est pas requis.

†† Des combinaisons de liants aux performances équivalentes peuvent être utilisées. (Se référer à CSA A23.1, Clauses 3.2, 3.3 et 3.4).

±± Ciment type 20E avec résistance aux sulfates modérée (se référer à CSA A23.1, Clause 3.1.2).

Note : Le type 50E ne doit pas être utilisé pour des bétons armés exposés aux chlorures et aux sulfates.

Se référer à CSA A23.1, Clause 15.4.

Voir CSA A23.2-08 et A23.2-08 pour les méthodes d'essais pour déterminer la teneur en ions sulfates.

Source: CSA A23.1

Étapes de calcul:

Choix de la teneur en eau

- Teneur en eau dans le béton est fonction:
 - * la teneur, la forme et la texture des GG
 - * Affaissement désiré
 - * Rapport E/L
 - * Teneur en air
 - * Dosage en liant
 - * adjuvants!
- Facteurs qui diminuent la demande en eau!

Choix de la teneur en eau (Tableau 9.5, p.155)

Affaissement (mm)	Quantité d'eau en kg/m ³ de béton pour les grosseurs maximales nominales de granulats indiquées*							
	10 mm	14 mm	20 mm	28 mm	40 mm	56 mm**	80 mm**	150 mm**
	Béton sans air entraîné							
25 à 50	207	199	190	179	168	154	139	113
75 à 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 à 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Quantité approximative d'air emprisonné dans du béton sans air entraîné (%)†	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
	Béton à air entraîné							
25 à 50	181	175	169	160	150	142	122	107
75 à 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 à 175	216	205	197	184	174	166	154	—
CSA A23.1 Teneur en air totale recommandée (%)†								
Catégorie 1	5 à 9	5 à 8		4 à 7		—	—	—
Catégorie 2	5 à 8	4 à 7		3 à 6		—	—	—

* Ces quantités d'eau de giclage sont destinées au calcul des facteurs liés pour les giclages d'essai. Il s'agit de maximums s'appliquant à des gros granulats anguleux d'assez bonne forme, dont la granulométrie reste dans les limites des spécifications acceptables.

** Les valeurs d'affaissement du béton contenant des gros granulats de plus de 40 mm proviennent d'essais effectués après que le béton a été débarrassé de ces particules par criblage par voie humide.

† Voir les tableaux 9-1 et 9-2 pour les classes d'exposition et les catégories de teneur en air correspondantes.

Adapté de CSA Standard A23.1, ACI 211.1 et ACI 308. Hower (1995) présente cette information sous forme graphique.

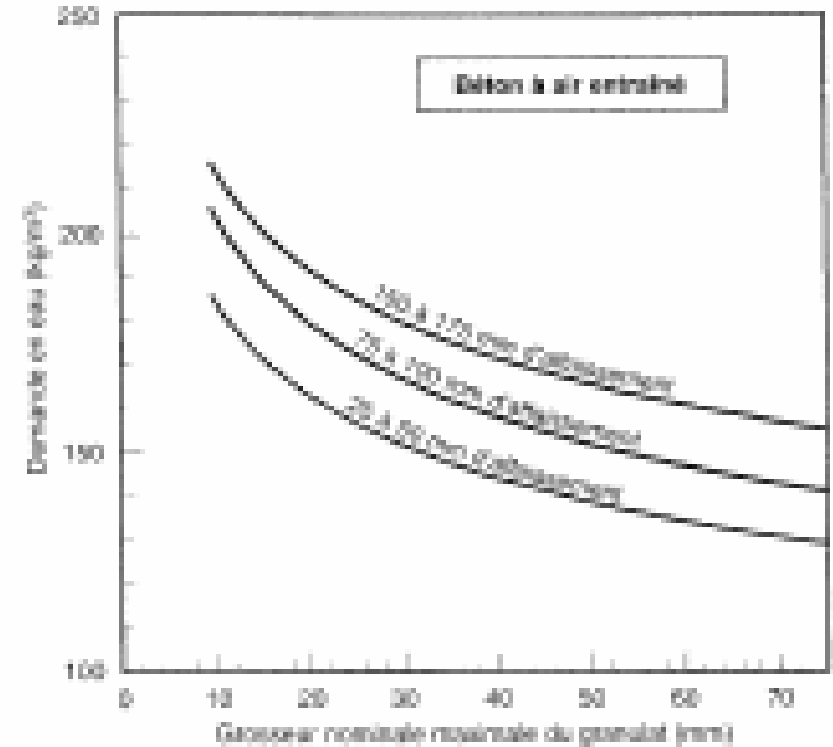
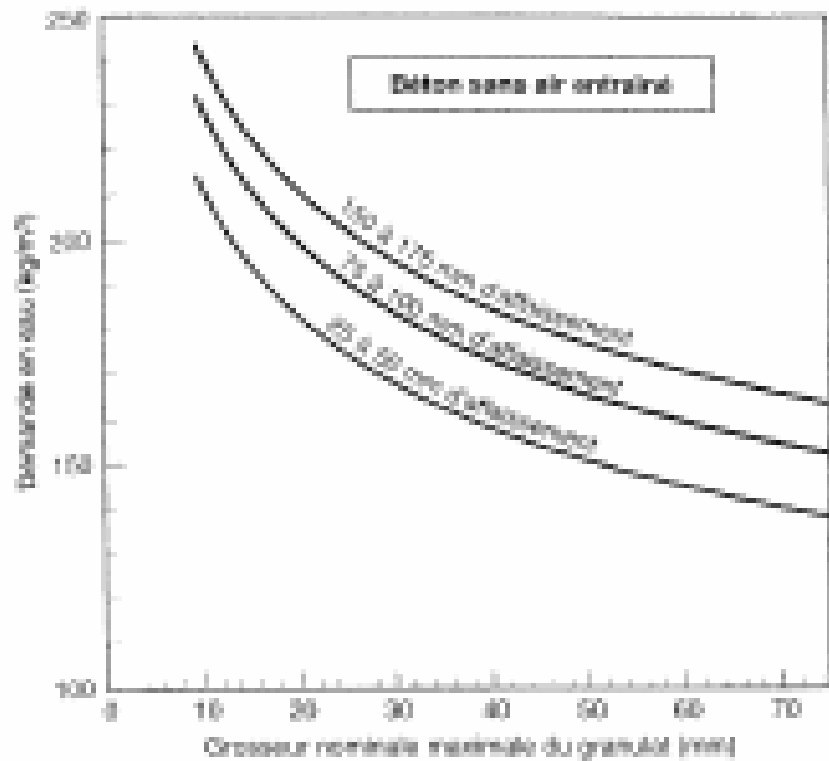


Figure 9.4 (p. 157)

Étapes de calcul:

Détermination du dosage et du type de liant

- On détermine le dosage en liant à partir du rapport E/L et de la teneur en eau!
 - Remarque: les spécifications contiennent le plus souvent des dosage minimales en ciment et une valeur max pour le rapport E/L
- Valeur minimale en ciment = garantir une durabilité donnée et une certaine facilité de finition, résistance à l'abrasion, apparence des surface verticales!
- des grandes quantités en liant??

Tableau 9.7 (p. 157)

Grosseur maximale nominale de granulats (mm)	Quantité de liants* (kg/m ³)
40	280
28	310
20	320
14	350
10	360

* Il peut être nécessaire d'accroître les quantités de liants en cas d'exposition sévère. Par exemple, pour une exposition aux sels de dégelage, le béton doit contenir au moins 335 kg/m³ de liants.
Adapté de ACI 302.

Étapes de calcul:

Détermination du dosage et du type de liant

- Conditions spéciales – exposition intense aux cycles de gel-dégel
 - * Une teneur minimal en liant de 335 kg/m³
 - * Juste assez d'eau pour atteindre la consistance désirée sans excéder le E/L max (Tableaux 9.1 et 9.2)
- Pour la mise en place du béton sous l'eau:
 - * la teneur en eau doit être au moins 390 kg/m³
 - * Rapport e/L max = 0,45

Tableau 9.1 (p. 152)

Critères de spécification du béton	Critères pour le béton		
Classe d'exposition [*]	Rapport eau/ciments maximum	Résistance spécifiée minimum en compression à 28 jours	Catégorie de teneur en air
C-1	0,40	35	—
C-2	0,45	32	1
C-3	0,50	30	2
C-4	0,55	25	2
F-1	0,50	30	1 ^{***}
F-2	0,55	25	2 ^{***}
N	pour besoins structuraux	pour besoins structuraux	

* Voir le tableau 8-2 en ce chapitre pour une description des classes d'exposition.

** Utiliser la catégorie 1 pour un béton exposé au gel-dégel.

Utiliser la catégorie 2 pour un béton non exposé au gel-dégel.

*** Les dalles de poteaux intérieurs et de congulateur avec une finition à la truelle d'acier performent de façon satisfaisante sans air entrainé.

Source : CSA A23.1.

Étapes de calcul:

Détermination du dosage et du type de liant

- Économie:
 - * Quantité du liant doit être maintenue au minimum sans affecter la qualité du béton – fonction du rapport E/L, donc réduire la quantité d'eau au minimum possible!! Trois possibilités:
 - 1) Béton plus raide possible!
 - 2) Plus de GG possible
 - 3) Rapport optimal de GF/GG

Étapes de calcul:

Volume d'air

- Air entraîné pour le béton exposé aux cycles de gel-dégel et aux agents de déglacage
- Les teneurs en air exigée pour le béton à air entraîné dépendent:
 - * Dimension des GG
 - * Conditions d'exposition (Tableau 9.5, p. 155)

Choix de la teneur en eau (Tableau 9.5, p.155)

Affaissement (mm)	Quantité d'eau en kg/m ³ de béton pour les grosseurs maximales nominales de granulats indiquées*							
	10 mm	14 mm	20 mm	28 mm	40 mm	56 mm**	80 mm**	150 mm**
	Béton sans air entraîné							
25 à 50	207	199	190	179	168	154	139	113
75 à 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 à 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Quantité approximative d'air emprisonné dans du béton sans air entraîné (%)†	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
	Béton à air entraîné							
25 à 50	181	175	169	160	150	142	122	107
75 à 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 à 175	216	205	197	184	174	166	154	—
CSA A23.1 Teneur en air totale recommandée (%)†								
Catégorie 1	5 à 9	5 à 8		4 à 7		—	—	—
Catégorie 2	5 à 8	4 à 7		3 à 6		—	—	—

* Ces quantités d'eau de giclage sont destinées au calcul des facteurs liés pour les giclages d'essai. Il s'agit de maximums s'appliquant à des gros granulats anguleux d'assez bonne forme, dont la granulométrie reste dans les limites des spécifications acceptables.

** Les valeurs d'affaissement du béton contenant des gros granulats de plus de 40 mm proviennent d'essais effectués après que le béton a été débarrassé de ces particules par criblage par voie humide.

† Voir les tableaux 9-1 et 9-2 pour les classes d'exposition et les catégories de teneur en air correspondantes.

Adapté de CSA Standard A23.1, ACI 211.1 et ACI 308. Hower (1995) présente cette information sous forme graphique.

Tableau 9.1 (p. 152)

Critères de spécification du béton	Critères pour le béton		
Classe d'exposition [*]	Rapport eau/ciments maximum	Résistance spécifiée minimum en compression à 28 jours	Catégorie de teneur en air
C-1	0,40	35	—
C-2	0,45	32	1
C-3	0,50	30	2
C-4	0,55	25	2
F-1	0,50	30	1 ^{***}
F-2	0,55	25	2 ^{***}
N	pour besoins structuraux	pour besoins structuraux	

* Voir le tableau 8-2 au ce chapitre pour une description des classes d'exposition.

** Utiliser la catégorie 1 pour un béton exposé au gel-dégel.

Utiliser la catégorie 2 pour un béton non exposé au gel-dégel.

*** Les dalles de poteaux intérieurs et de congulateur avec une finition à la truelle d'acier performent de façon satisfaisante sans air entrainé.

Source : CSA A23.1.

Étapes de calcul:

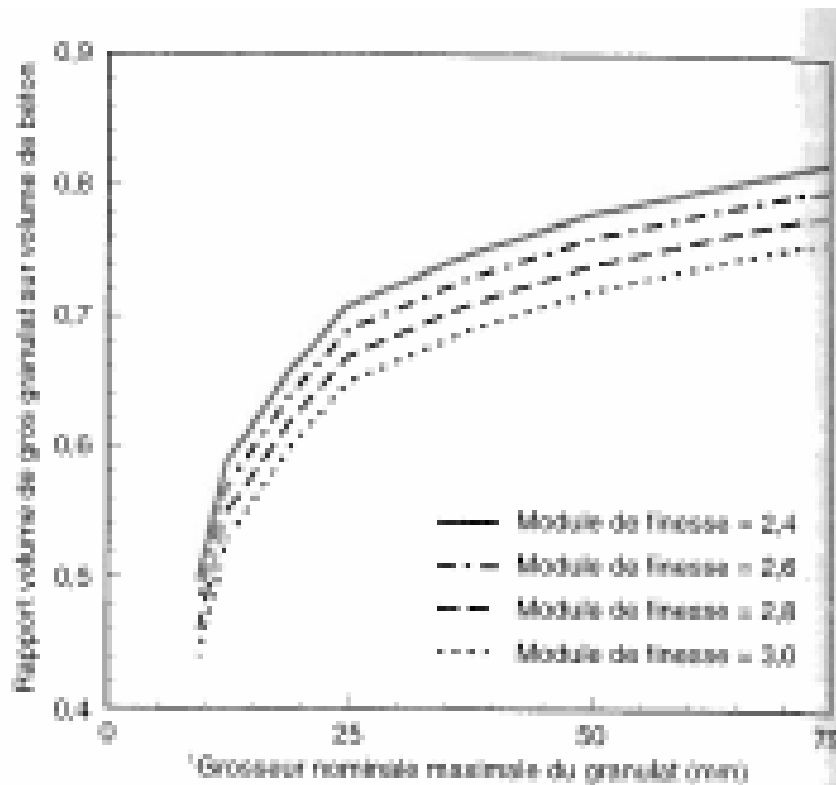
Teneur en GG

- CSA prescrit de limiter le $\phi_{\max}$ des GG:
 - * au recouvrement stipulé dans le cas du béton non exposé à la terre ou aux conditions climatiques
 - * 2/3 dans le cas contraire
 - * 1/2 du recouvrement dans le cas du béton exposé aux chlorures
- Pour le béton pompé, le $\phi_{\max}$ est limité au 1/3 du plus petit diamètre interne des tuyaux

Étapes de calcul:

Teneur en GG

- Le volume des GG pilonné à sec par unité de volume de béton est déterminé en fonction du sable utilisé (mf) – Fig. 9.3.



Grossier maximale des granulats (mm)	Volume de gros granulats pilonnés à sec par unité de volume de béton pour différents modules de finesse de granulats fins*			
	2,40	2,60	2,80	3,00
10	0,50	0,48	0,46	0,44
14	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,60
28	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
56	0,78	0,76	0,74	0,72
80	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

*Les volumes sont établis pour des granulats pilonnés à sec de la façon décrite dans CSA A23.2-10A (ASTM C 29). Adapté de ACI 211.1.

Étapes de calcul:

Teneur en GG

- Pour un béton moins maniable – augmenter le volume en GG de 10%
- Pour un béton plus maniable (pompage) – réduire de 10%

Étapes de calcul:

Donnée de calcul

- Les densités des matériaux (ciment, sable et GG)
- Masse volumique SSS des GG (ex. 1600 kg/m^3)
- ABS des granulats (sable et GG)
- Teneur en eau (W) des granulats (sable et GG)
- Le module de finesse du sable.

Exemples de calcul:

Dosage à partir des données de chantier

- Mélange actuel ou antérieur peut être utilisé pour un nouveau chantier – résistance et écart type ACI 318 sont acceptables!! – durabilité aussi
- Les données utilisées pour le dosage doivent s'appliquer à un béton dont f'_c ne s'écarte pas de plus de 7 MPa de la résistance requise pour le chantier proposé
- Échantillon représentatif!! ($n = 30$) – essais consécutifs ou deux groupes ($n = 30$)

Exemples de calcul:

Dosage à partir des données de chantier

- Si $n = 15$ à 29 ??

Nombre d'essais [*]	Facteur de modification de l'écart type ^{**}
Moins de 15	Utiliser tableau 9-11
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 ou plus	1,00

^{*} Interpoler dans le cas de nombres d'essais intermédiaires.

^{**} On doit utiliser l'écart type modifié pour déterminer la résistance moyenne nécessaire, f_{cm} .

Adapté de ACI 318.

Exemples de calcul:

Dosage à partir des données de chantier

- Écart modifié est employé (CSA):

$$f'_{cr} = f'_c + 1,4S$$

$$f'_{cr} = f'_c + (2,5S - 3,5 \text{ MPa})$$

- Écart modifié est employé (ACI 318):

$$f'_{cr} = f'_c + 1,34S$$

$$f'_{cr} = f'_c + (2,33S - 3,45 \text{ MPa})$$

Exemples de calcul:

Dosage par mélange d'essai

- Pas de données sur chantier ou insuffisantes
- Mélanges d'essais- formulation proposée pour les travaux
- 3 mélanges avec 3 rapports E/L et dosages en liant différents – englober la valeur f'_{cr}
- Affaissement à ± 20 mm et une teneur en air $\pm 0,5\%$ du maximum

Contrôle de qualité

Type de contrôle	Écart type pour différentes exigences de contrôle (MPa)				
Variation globale	Excellent	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre
Prélèvement des échantillons au chantier	moins de 2,8	2,8 à 3,4	3,4 à 4,1	4,1 à 4,8	plus de 4,8
Prélèvement des échantillons en usine ou au laboratoire	moins de 1,4	1,4 à 1,7	1,7 à 2,1	2,1 à 2,4	plus de 2,4
Contrôle de la qualité de l'inspection					
	Coefficient de variation pour différentes exigences de contrôle en %				
Variation dans l'essai	Excellent	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre
Prélèvement des échantillons au chantier	moins de 3	3 à 4	4 à 5	5 à 6	plus de 6
Prélèvement des échantillons en usine ou au laboratoire	moins de 2	2 à 3	3 à 4	4 à 5	plus de 5

Contrôle de qualité

Overall variation					
Class of operation	Standard deviation for different control standards, MPa (psi)				
	Excellent	Very good	Good	Fair	Poor
General construction testing	Below 2.8 (below 400)	2.8 to 3.4 (400 to 500)	3.4 to 4.1 (500 to 600)	4.1 to 4.8 (600 to 700)	Above 4.8 (above 700)
Laboratory trial batches	Below 1.4 (below 200)	1.4 to 1.7 (200 to 250)	1.7 to 2.1 (250 to 300)	2.1 to 2.4 (300 to 350)	Above 2.4 (above 350)

Within-test variation					
Class of operation	Coefficient of variation for different control standards, %				
	Excellent	Very good	Good	Fair	Poor
Field control testing	Below 3.0	3.0 to 4.0	4.0 to 5.0	5.0 to 6.0	Above 6.0
Laboratory trial batches	Below 2.0	2.0 to 3.0	3.0 to 4.0	4.0 to 5.0	Above 5.0

* $f'_c \leq 34.5$ MPa (5000 psi).

Exemple de calcul (p.161)

Site WEB – description des essais de caractérisation

<http://www.aciquebec.com/images/ACI/swf/index.html>