



C) Composition de béton : Dosage pondéral



I : Méthode de Faury

1.1. Introduction

En dosage volumétrique ou dosage pondéral, toute composition de béton doit être guidée par deux critères essentiels : la résistance et l'ouvrabilité (facilité de mise en œuvre).

Ferret et Bolomey ont démontré que la résistance du béton croît avec la compacité (volume occupé par les matières solides dans un mètre cube de béton frais) et avec le rapport C/E. Pour la résistance du béton en compression f_{cm} , Bolomey propose la formule approximative suivante :

$$f_{cm} = G \sigma'_C (C/E - 0,5)$$

Où :

f_{cm} : résistance moyenne en compression ciblée à 28 jours (MPa)

G : coefficient granulaire fonction de la nature et de la qualité des granulats

σ'_C : classe vraie du ciment à 28 jours

C : dosage en ciment en kg/m³ de béton

E : dosage en eau totale sur matériaux secs

Cette relation laisse supposer qu'il suffit d'augmenter le dosage en ciment pour obtenir un béton de qualité. Malheureusement, ce n'est pas le cas, car de grandes valeurs du rapport C/E donnent un béton trop sec, donc peu ouvrable (C/E ↗, ouvrabilité ↘).

Parmi les méthodes les plus utilisées, on peut citer :

- Bolomey,
- Faury,
- Joisel et Valette,
- Dreux,
- Olivier et Baron, etc.

La différence entre ces méthodes réside dans la définition de la courbe granulométrique de référence, selon que l'on inclue ou non le ciment dans les matières fines. Néanmoins, toutes ces méthodes ont un point commun : elles dépendent des caractéristiques des matériaux utilisés (forme, nature et qualité des granulats, type de liant, etc.,).

1.2. Principe de la méthode de Faury

C'est une méthode à granularité continue*. Elle permet de tracer une courbe granulométrique de référence en tenant compte de l'effet de paroi, de la nature des grains, de la plasticité recherchée, de la puissance du serrage, ... Il s'agit donc de fabriquer avec les granulats disponibles un béton dont la courbe du mélange granulaire soit aussi proche que possible de la courbe théorique de référence.

(*) Remarque

Une méthode est dite à granularité continue si l'analyse granulométrique du mélange constituant le béton donne une courbe s'élevant d'une manière continue, c'est-à-dire, du grain de ciment d_c au plus gros grain D tous les diamètres intermédiaires sont présents.

1.2.1. Tracé de la courbe théorique de référence selon Faury

L'étude des mélanges granulaires montre que quel que soit le mélange (sable + gravillon + gravier), le tracé de la courbe de référence peut être représenté approximativement par deux segments de droite (AB et BC), représentation simplifiée de la courbe granulaire du mélange (Fig.1.f).

Où,

A : origine

B : point de brisure

C : extrémité

Les points A et C sont invariables quel que soit les proportions du mélange, et ont pour coordonnées selon Faury :

- A (0,0065 mm, 0 %)
- C (D, 100 %)

Quant au point de brisure B, il se situe en moyenne entre le module 38 et le module correspondant à D.

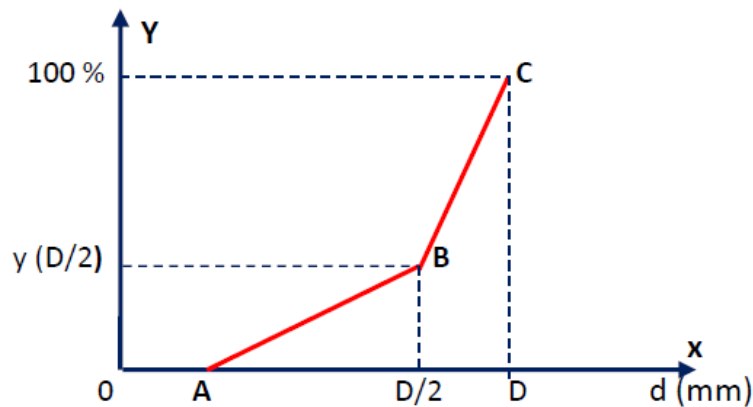


Figure 1.f : Tracé de la courbe théorique de référence selon Faury

L'ordonnée du point de brisure B est fixée de sorte à obtenir la meilleure compacité du béton.

L'approche proposée par Faury est la suivante :

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace une composition granulaire de référence ABC. Elle est composée de deux segments de droite AB et BC ($< D/2$ pour les grains fins et moyens, $> D/2$ pour les gros grains). Elle donne le pourcentage en volumes absolus (ciment + granulats) en fonction des diamètres des grains.

Cette courbe se définit comme suit :

$$\text{Point A} \quad \begin{cases} x = 0,0065 \text{ mm (à traduire en } \sqrt[5]{d}) \\ y = 0 \end{cases}$$

$$\text{Point B} \quad \begin{cases} x = D/2 \\ y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \end{cases}$$

$$\text{Point C} \quad \begin{cases} x = D \\ y = 100 \% \end{cases}$$

Où,

R : rayon moyen du moule = V/S

S : surface totale des parois en contact avec le béton (coffrage + ferrailage + gaine)

V : volume du moule (volume à considérer n'est pas celui de la pièce complète à bétonner, mais celui de ses parties les plus ferrillées)

D : dimension maximale des granulats

B = 1,5 pour les bétons mis en place par piquage

B = 1 dans tous les autres cas

A : coefficient fonction de la nature des granulats et des moyens de serrage du béton (Tab.1.f)

Tableau 1.f : Valeurs du coefficient A

Moyen de mise en place du béton	Matériaux utilisés		
	Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé
Mise en place par piquage	28 et plus	30 et plus	32 et plus
Vibrations moyennes			
Table vibrante 50 cycles/sec Amplitude 0,8	24 - 25	27 - 28	28 - 29
Pervibrateur 200 cycles/sec Amplitude 0,3	24	27 - 28	28 - 29
Vibrations poussées			
Table vibrante 50 cycles/sec Amplitude 0,8	23 - 24	23 - 24	23 - 24
Pervibrateur 200 cycles/sec Amplitude 0,3	23 - 24	24 - 25	23
Vibrations puissantes			
Table vibrante 100 cycles/sec Amplitude 0,8	19 - 20	19 - 21	19 - 22
Vibrateur de coffrage 200 c/s Amplitude 0,3	20 - 21	21 - 22	24 - 25

1.2.2. Estimation de l'eau de gâchage

Faury estime la quantité d'eau de gâchage comme étant égale au volume théorique des vides, soit :

$$I \text{ (litre)} = \frac{1000 k}{\sqrt[5]{D}} + \frac{1000 k'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Où,

$k' = 0,004 \rightarrow$ Béton mou

$k' = 0,003 \rightarrow$ Béton plastique

$k' = 0,002 \rightarrow$ Béton ferme

Les valeurs de k figurent dans le tableau ci-après.

Tableau 2.f : Valeurs de k

Moyen de mise en place du béton	Matériaux utilisés		
	Sable roulé Gravier roulé	Sable roulé Gravier concassé	Sable concassé Gravier concassé
Mise en place par piquage	0,345 et plus	0,345 et plus	0,350 et plus
Vibrations moyennes Table vibrante 50 c/sec Pervibrateur 200 c/sec	0,265 - 0,285 0,270	0,285 - 0,350 0,280 - 0,290	0,300 - 0,335 0,305 - 0,315
Vibrations poussées Table vibrante 50 c/sec Pervibrateur 200 c/sec	0,255 - 0,280 0,255	0,260 - 0,285 0,280 - 0,290	0,265 - 0,295 0,290 - 0,305
Vibrations puissantes Table vibrante 100 c/sec Vibrateur de coffrage 200 c/sec	0,245 - 0,265 0,255 - 0,265	0,250 - 0,280 0,265 - 0,280	0,255 - 0,295 0,270 - 0,295

Remarque

En pratique, la quantité d'eau ainsi définie est insuffisante pour une bonne mise en œuvre, il est souhaitable d'en rajouter 10 à 30 % d'eau supplémentaire en fonction de l'ouvrabilité désirée. Par conséquent, cela revient à utiliser une quantité d'eau équivalente à :

$$E \text{ (litre)} = (1,1 \text{ à } 1,3) \text{ l}$$

1.2.3. Compacité

La compacité d'un tel béton est donnée par :

$$\lambda = 1 - E = 1 - \frac{k}{\sqrt[5]{D}} + \frac{k'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Dans la pratique, le dosage en ciment est imposé ou bien déduit de la formule de Bolomey :

$$f_c = G \sigma'_c (C/E - 0,5)$$

Où,

G : coefficient granulaire fonction de la nature et de la qualité des granulats (Tab.3.f)

σ'_c : classe vraie du ciment à 28 jours

C : dosage en ciment en kg/m³ de béton

E : dosage en eau totale sur matériaux secs

Tableau 3.f : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 12,5	20 ≤ D ≤ 31,5	D ≥ 50
	Fins	Moyens	Gros
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Il ne reste plus qu'à déterminer les proportions de granulats pour que la courbe du mélange solide soit la plus proche possible de la courbe de référence.

1.3. Données de base

1.3.1. Dosage en ciment

À titre d'exemple, on peut utiliser un ciment CPJ dosé à 350 kg/m³ ou toute autre spécification donnée par le chargé du suivi des travaux pratiques.

1.3.2. Nature des granulats

Pour un béton ternaire, trois types de granulats peuvent être utilisés, par exemple :

- Granulat 1 : sable de rivière (ou autre)
- Granulat 2 : graviers concassés (ou roulés)
- Granulat 3 : gravillons concassés (ou roulés)

On désigne par :

ρ_c : masse volumique absolue du ciment

ρ_s : masse volumique absolue du sable

ρ_G : masse volumique absolue du gravier

ρ_g : masse volumique absolue du gravillon

Remarque

Les teneurs en eau des granulats en % (ω_s , ω_G , ω_g) sont déterminées avant la confection du béton.

1.3.3. Vérification de la dimension maximale D des granulats

La vérification de D porte sur l'enrobage des aciers e , l'espacement entre les armatures longitudinales a , le rayon du moule R et le rayon du ferrailage r (Tab.4.f).

Tableau 4.f : Dimension maximale des granulats D

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Granulats D	
	Roulés	Concassés
e : espacement entre armatures horizontales	$D \leq 0,9e$	$D \leq 0,8e$
c : couvertures entre armatures et coffrage	$D \leq 0,8c$	$D \leq 0,7c$
r : rayon moyen des mailles du ferrailage	$D \leq 1,8r$	$D \leq 1,6r$
h_m : épaisseur minimale de la pièce à bétonner	$D \leq \frac{h_m}{4}$	$D \leq \frac{h_m}{4}$
R : rayon moyen du moule	$D \leq 1,2 R$	$D \leq R$

1.3.3.1. Rayon moyen du moule R

L'effet de paroi représente la plus ou moins grande difficulté à remplir un moule (ou coffrage) dans lequel les surfaces en contact avec le béton (coffrages, armatures, gaines, ...) sont plus ou moins importantes par rapport au volume. Il se traduit par l'enrichissement en mortier (sable + ciment) du béton au contact ou à proximité d'une paroi (coffrage ou armature).

La quantité de mortier attiré est proportionnelle à $D \times S$, où D représente la dimension maximale des granulats et S la surface totale des parois en contact avec le béton (coffrage + ferrailage).

L'appauvrissement relatif du béton en mortier est donc proportionnel à :

$$(D \times S) / V = D/R \rightarrow R = V/S$$

R : rayon moyen du moule

En pratique, pour la détermination de R , le volume V du moule à considérer n'est pas celui de la pièce complète, mais celui de ses parties les plus ferraillées (Fig.2.f).

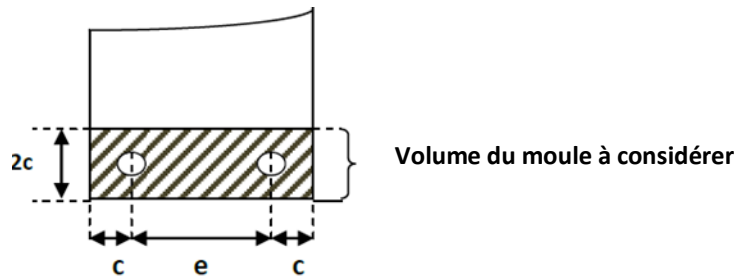
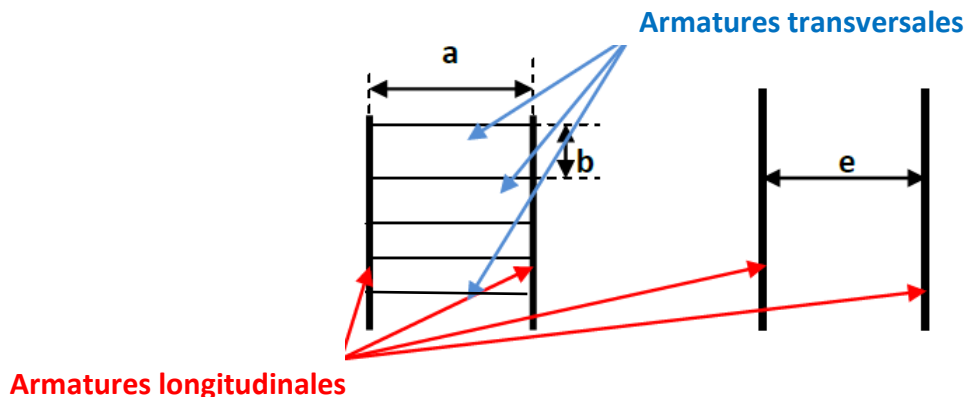


Figure 2.f : Volume de la partie la plus ferraillée

1.3.3.2. Rayon moyen r d'un ferrailage

Pour une maille : $r = \frac{a \times b}{2(a + b)}$

Entre deux barres : $r = \frac{e}{2}$



1.3.4. Courbe granulométrique de référence

Elle représente la courbe théorique du mélange ciment + sable + graviers (Fig.3.f).

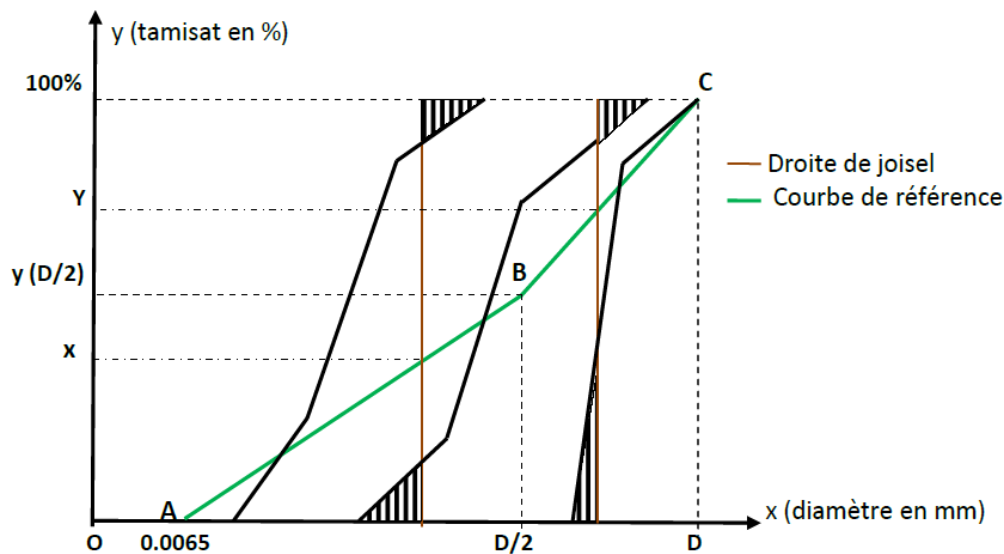


Figure 3.f : Tracé de la courbe théorique de référence du mélange

Les pourcentages des constituants du béton, à l'exception de l'eau, sont déterminés graphiquement à partir de la droite de Joisel. Cela consiste à tracer des droites parallèles à l'axe des ordonnées délimitant de part et d'autre de deux courbes granulométriques successives des aires approximativement égales (Fig.3.f). Les points d'intersection des droites avec la courbe de référence ont pour ordonnées x et y .

Où,

x : pourcentage en volume absolu de sable et de ciment

$(y - x)$: pourcentage en volume absolu de gravillon

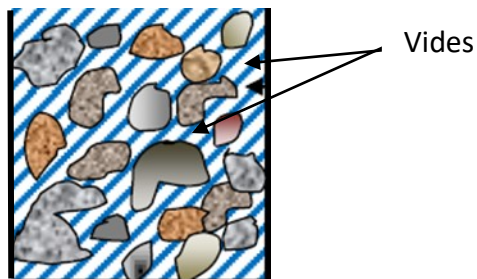
$(100 - y)$: pourcentage en volume absolu de gravier

Pour déterminer les volumes absolus des constituants du béton, il faut connaître le volume total des constituants solides dans un mètre cube de béton, et par conséquent la quantité d'eau nécessaire.

1.3.5. Quantité d'eau de gâchage

Le volume des vides / contenu dans un récipient rempli par un mètre cube de béton est :

$$I \text{ (m}^3\text{)} = \frac{k}{\sqrt[5]{D}} + \frac{k'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$



Si la quantité d'eau ainsi définie est insuffisante pour une bonne mise en œuvre, on peut rajouter de l'eau, environ 10 à 30 % en fonction de l'ouvrabilité désirée. Dans ce cas, la quantité d'eau de gâchage E est prise telle que :

$$1,1 \leq E \leq 1,3$$

Par conséquent, le volume total des constituants solides est :

$$V_s = (1 - E)$$

Si un adjuvant a est ajouté, le volume total des constituants solides devient :

$$V_s = (1 - E - a)$$

1.3.6. Composition pondérale des constituants solides

Dans le cas d'un béton ternaire, les composants solides pour un mètre cube de béton sont :

$$V_c + V_s + V_g + V_G = 1 - E \rightarrow V_c = \frac{c}{\rho_c}$$

$$V_s = \frac{x}{100} (1 - E) - V_c \rightarrow P_s = \rho_s \times V_s$$

$$V_g = \frac{y - x}{100} (1 - E) \rightarrow P_g = \rho_g \times V_g$$

$$V_G = \frac{(100 - y)}{100} (1 - E) \rightarrow P_G = \rho_G \times V_G$$

Où, P_s , P_g et P_G représentent respectivement les poids (à l'état sec) du sable, du gravillon et du gravier.

Remarque

À défaut d'indications précises concernant les masses volumiques des matériaux, on peut utiliser (dans une première approximation) les valeurs suivantes :

$$\rho_{c,abs} = 3100 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s,abs} = \rho_{g,abs} = \rho_{G,abs} = 2600 \text{ kg/m}^3$$

1.3.7. Correction de la teneur en eau

Au moment de la préparation de la composition, les granulats peuvent être humides. Dans ce cas, il faut mesurer la quantité d'eau contenue dans ces granulats et corriger les dosages précédemment déterminés. Cette quantité est égale à : $w \times P_{sec}$

Où,

$$w : \text{teneur en eau} = \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids sec}} = \frac{P_{humide} - P_{sec}}{P_{sec}}$$

Le poids à introduire dans le malaxeur est donc :

$$P_{humide} = P_{sec} + (w \times P_{sec})$$

La quantité d'eau ($w \times P_{sec}$) est à retrancher à la quantité d'eau de gâchage trouvée (E).

Les résultats de la formulation du béton peuvent être présentés sous forme de tableau comme ci-dessous.

Tableau 4.f : Résultats de la formulation

Paramètres Composants	Volume absolu (m ³)	Poids sec (kg)	Teneur en eau	Eau contenue dans les granulats	Poids humide à introduire dans le malaxeur
Ciment					
Sable					
Gravillon					
Gravier					
Eau					
ρ théorique béton					

1.4. Application

1.4.1. Données

Il s'agit de déterminer la composition d'un béton binaire composé d'un sable 0/5 et d'un gravier 3/8 par la méthode de Faury en utilisant les hypothèses suivantes :

- Partie d'ouvrage : Poutre (Fig.4.f).
- Consistance : Béton plastique
- Type de vibration : Vibrations moyennes + piquage
- Classe de ciment : CPJ - CEMII/B32.5R ($\sigma_c = 40$ MPa, $\rho_c = 3100$ kg/m³)
- Nature des granulats : Concassés, de qualité passable
- Masse volumique absolue des granulats : $\rho_{abs, G} = 2640$ kg/m³, $\rho_{abs, S} = 2670$ kg/m³

1.4.2. Travail demandé

À partir du tracé des courbes granulométriques des granulats (Fig.5.f) :

1. Tracer la courbe de référence théorique ABC.
2. Calculez le module de finesse du sable.
3. Donnez les pourcentages des granulats (S%, G%).
4. Calculez la compacité (1 - E) sachant que le volume absolu des matières solides V_{ms} est égal à :

$$V_{ms} = V_C + V_S + V_G$$
5. À partir des pourcentages de chaque granulats, calculez les volumes absolus du sable et du gravier.
6. Calculez les masses des composants du béton.

1.4.3. Caractéristiques de la pièce à bétonner

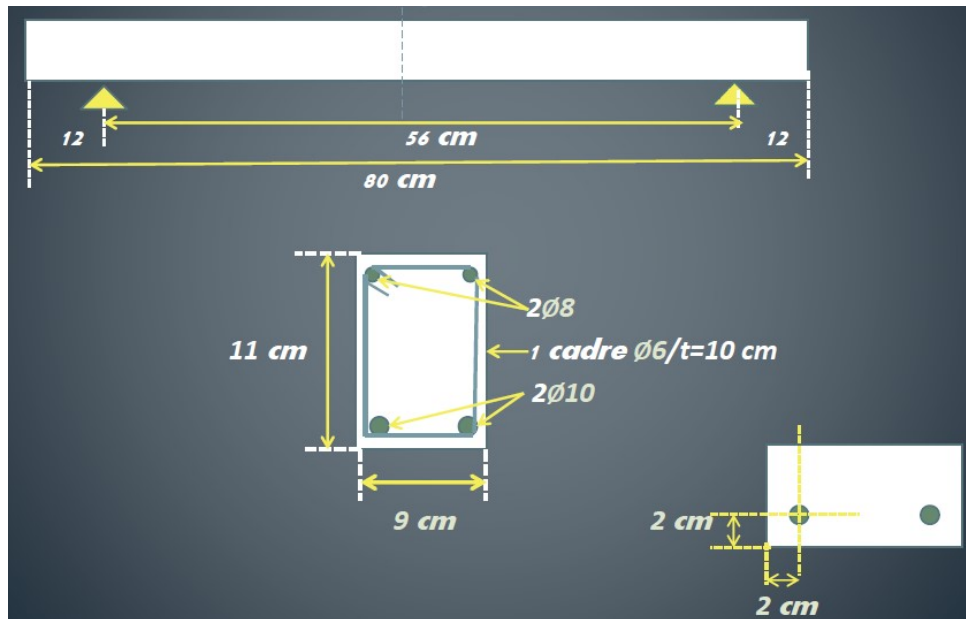


Figure 4.f : Dimensions de la poutre

1.4.4. Résultats

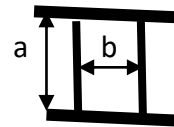
1.4.4.1. Vérification de la dimension maximale des granulats D

La vérification de D porte sur l'enrobage des aciers c , l'espacement entre les armatures longitudinales e , le rayon du moule R et le rayon moyen du ferrailage r .

1. Rayon moyen des mailles de ferrailage r

$$r = \frac{a \times b}{2(a + b)} = \frac{5 \times 10}{2(5 + 10)} = 16,7 \text{ mm}$$

$$r = 16,7 \text{ mm}$$



2. Rayon moyen du moule R

En pratique, pour la détermination de R , le volume du moule à prendre en considération, n'est pas celui de la pièce complète mais uniquement de ses parties les plus ferrillées. Soit :

$$R = \frac{2c \times b \times L}{(bL) + 2(2cL) + 2(2cb) + 2\pi\Phi L} \approx 1,5 \text{ cm}$$

$$R = 1,5 \text{ cm}$$

3. Détermination de D (Tab.4.f)

$$D \leq 0,8 e = 0,8 \times 5 = 4 \text{ cm}$$

$$D \leq 0,7 c = 0,7 \times 2 = 1,4 \text{ cm}$$

$$D \leq 1,6 r = 1,6 \times 1,67 = 2,672 \text{ cm}$$

$$D \leq h_m/4 = 9/4 = 2,25 \text{ cm}$$

$$D \leq R = 1,5 \text{ cm}$$

→ Diamètre maximal $D \leq 14 \text{ mm}$ → Pour cette application, on prend $D = 10 \text{ mm}$

1.4.4.2. Dosage en ciment

Pour cette application, le dosage en ciment est pris égal à 350 kg/m³.

1.4.4.3. Dosage en eau

Sur des matériaux secs, le dosage en eau totale est approximativement égal à :

$$I \text{ (litre)} = \frac{1000 k}{\sqrt[5]{D}} + \frac{1000 k'}{\frac{R}{D} - 0,75} \rightarrow \begin{cases} k = 0,300 \text{ (Tab.2.f)} \\ k' = 0,003 \text{ (béton plastique)} \\ D = 10 \text{ mm} \end{cases}$$

Si la quantité d'eau ainsi définie est insuffisante pour une bonne mise en œuvre, on peut en rajouter, environ 10 à 30 % en fonction de la l'ouvrabilité désirée. Comme première tentative, on prend une quantité d'eau (qui sera appelée à être corrigée en fonction de l'affaissement obtenu) égale à :

$$E = 1,2 I = 231 \text{ litres}$$

1.4.4.4. Module de finesse

Le module de finesse est un coefficient caractérisant l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100^e de la somme des refus exprimés en pourcentages sur les tamis de la série suivante :

- 0,16 mm (module 23)
- 0,315 mm (module 26)
- 0,63 mm (module 29)
- 1,25 mm (module 32)
- 2,50 mm (module 35)
- 5 mm (module 38)

Le sable entrant dans la composition du béton à un module de finesse égal à (Fig.5.f) :

- D = 0,16 mm → 97,2 %
- D = 0,315 mm → 94,65 %
- D = 0,63 mm → 81,45 %
- D = 1,25 mm → 52,5 %
- D = 2,5 mm → 16,0 %
- D = 5 mm → 0,0 %

$$\text{Total} = 341,8 \rightarrow MF = 341,8/100 = 3,42$$

MF = 3,42 → Sable ne possédant pas assez de fines

Remarque : Comment corriger le module de finesse ?

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8, en-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins, au-dessus, il lui manque des fines.

Supposons que l'on dispose d'un sable *S1* de module de finesse *MF1* trop fort et que l'on désire y ajouter un sable fin *S2* de module de finesse *MF2* afin d'obtenir un sable mélangé *S* avec un module de finesse optimal, c'est-à-dire MF = 2,5. Pour réaliser ce mélange, on applique la règle d'Abrams qui stipule :

Si $MF_2 < MF < MF_1$, les proportions de S_1 et S_2 sont :

$$x_1 \% = \frac{M_F - M_{F2}}{M_{F1} - M_{F2}} \Leftrightarrow x_2 \% = \frac{M_{F1} - M_F}{M_{F1} - M_{F2}}$$

À titre d'exemple, si $MF_1 = 3,42$ (sable S_1) et $MF_2 = 2$ (sable S_2), pour obtenir un mélange de sable S ($S = S_1 + S_2$) avec un module de finesse $MF = 2,5$, on applique la règle d'Abrams. Les proportions obtenues sont :

- Sable $S_1 = \frac{2,5 - 2,0}{3,42 - 2,0} = 35 \%$
- Sable $S_2 = \frac{3,42 - 2,5}{3,42 - 2,0} = 65 \%$

1.4.4.5. Tracé de la courbe granulaire de référence ABC

La courbe du mélange granulaire de référence est tracée sur le graphique des courbes granulométriques des granulats (Fig.5.f). Elle a pour coordonnées :

$$\text{Point A} \rightarrow \begin{cases} x_A = 0,0065 \text{ mm} \\ y_A = 0 \% \end{cases}$$

$$\text{Point C} \rightarrow \begin{cases} x_C = D = 10 \text{ mm} \\ y_C = 100 \% \end{cases}$$

$$\text{Point B} \rightarrow \begin{cases} x_B = D/2 = 10/2 = 5 \text{ mm} \\ y_B = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75} \end{cases}$$

Où,

$A = 28,5$ (vibrations moyennes + granulats concassés)

$B = 1$ (béton mis en place par piquage + vibrations moyennes)

$R = 15 \text{ mm}$

L'ordonnée du point de brisure y_B est :

$$y_B = 28,5 + 17 \sqrt[5]{10} + \frac{1}{\frac{15}{10} - 0,75} = 56,776 \% \approx 57 \%$$

$$y_B \approx 57 \%$$

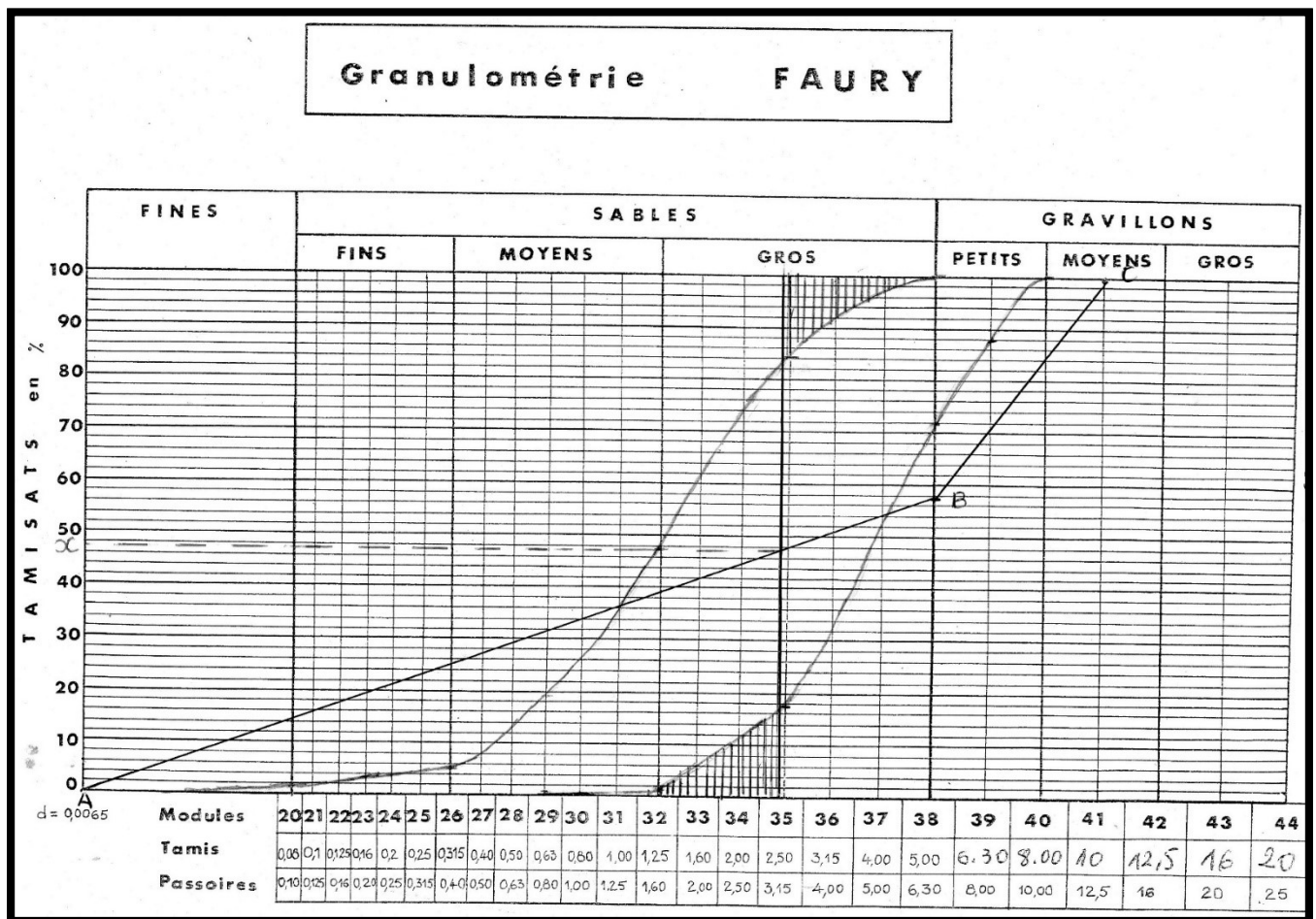


Figure 5.f : Courbes granulométriques + courbe granulaire de référence + lignes de partage

1.4.4.6. Pourcentage des granulats

Les pourcentages des composants du béton s'obtiennent graphiquement à partir de la figure ci-dessus en utilisant la droite de Joisel. À partir de ce tracé (Fig.5.f), on obtient les pourcentages suivants :

- Ciment + Sable 0/5 → $x = 47 \%$
- Gravier 3/8 → $100 - x = 53 \%$

Les pourcentages relevés graphiquement se rapportent aux volumes absolus des granulats.

1.4.4.7. Composition pondérale des constituants solides

Dans le cas d'un béton binaire, les composants solides correspondant à un mètre cube de béton sont:

$$V_C + V_S + V_G = 1 - E \rightarrow V_C = \frac{C}{\rho_C} = \frac{350}{3100} = 0,113 \text{ m}^3$$

$$V_C = 0,113 \text{ m}^3$$

$$V_S = \frac{x}{100} (1 - E) - V_C = \frac{47}{100} (1 - 0,230) - 0,113 = 0,249 \text{ m}^3 \rightarrow P_S = \rho_S \times V_S = 2670 \times 0,249 = 665 \text{ kg}$$

$$P_S = 665 \text{ kg}$$

$$V_G = \frac{(100 - x)}{100} (1 - E) = \frac{(100 - 47)}{100} (1 - 0,230) = 0,41 \text{ m}^3 \rightarrow P_G = \rho_G \times V_G = 2640 \times 0,41 = 1082 \text{ kg}$$

$$P_G = 1082 \text{ kg}$$

Récapitulatif du dosage des granulats

Les volumes absolus des constituants sont :

- Volume absolu du ciment = 113 litres
- Volume absolu du sable = 249 litres
- Volume absolu du gravillon = 410 litres

Les dosages en matériaux secs sont :

- Sable = 665 kg
- Gravillon = 1082 kg
- Ciment = 350 kg
- Eau = 230 kg

Soit une masse totale égale à 2327 kg pour 1 mètre cube de béton. Cela correspond à une densité théorique Δ_0 de :

$$\Delta_0 = 2,33$$

II : Méthode de Dreux-Gorisse

2.1. Introduction

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode qui permet de définir de façon simple et rapide une composition de béton adaptée à un ouvrage ou à une partie de l'ouvrage. La formule trouvée doit être vérifiée par des essais sur béton frais et sur béton durci afin d'ajuster la composition à adopter en fonction des qualités ciblées et des matériaux effectivement utilisés.

2.2. Principe de la méthode de Dreux-Gorisse

Le principe consiste à déterminer le mélange optimal des différents granulats ainsi que le dosage en ciment et en eau, qu'il faut corriger par la suite par des essais sur béton frais et béton durci pour réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées, à savoir :

- une résistance moyenne souhaitée à 28 jours,
- une ouvrabilité ciblée caractérisée par un affaissement au cône d'Abrams.

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse par trois phases :

- Obtention d'un rapport C/E (ciment/eau) à partir de la qualité de la pâte souhaitée, et donc de la résistance.
- Détermination de la quantité de pâte (C + E) et la compacité du squelette granulaire maximum résultant de l'ouvrabilité ciblée.
- Bilan des quantités de chacun des composants du béton (C, E, S, G) et densité théorique du béton Δ_0 .

2.2.1. Résistance souhaitée

Elle est fonction de la résistance de calcul f_{C28} nécessaire à la construction d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. En tenant compte des dispersions et des écarts quadratiques, la résistance moyenne visée à 28 jours doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à 20 % à la résistance de calcul f_{Ci} , soit :

$$f_C = f_{C28} + 15 \% \rightarrow f_C = 1,15 \times f_{C28}$$

2.2.2. Maniabilité désirée

La maniabilité est choisie en fonction du type d'ouvrage, de la difficulté du bétonnage, et des moyens de vibrations disponibles (Tab.1.d).

Tableau 1.d : Affaissement au cône d'Abrams en fonction du type d'ouvrage à réaliser

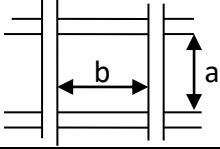
Affaissement (cm)	Plasticité	Moyen de serrage	Utilisation
0 à 4	Béton ferme	Vibration puissante	Béton de VRD
5 à 9	Béton plastique	Vibration normale	Ouvrages d'art
10 à 15	Béton très plastique	Vibration faible	Ouvrages courants
> 15	Béton fluide	Leger piquage	Fondation profonde, dalle, voile mince

2.3. Dimension maximale des granulats

Pour une bonne facilité de mise en œuvre, la dimension maximale D du granulat se trouve limitée par différentes considérations concernant la partie d'ouvrage à bétonner. Elle correspond à la dimension du plus gros granulat considéré séparément. Elle se détermine par tamisage et sa valeur est telle que le pourcentage de refus sur le tamis de maille D (mm) soit compris entre 1 % et 15 %.

Le tableau ci-après donne une évaluation approximative de D en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'enrobage des armatures.

Tableau 2.d : Détermination de D en fonction du ferrailage et de l'enrobage

Caractéristiques de la pièce à bétonner	Diamètre maximal des granulats
e_h : espacement entre armatures horizontales	$D \leq e_h/1,5$
e_v : espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$D \leq e_v$
c : couvertures entre armatures et coffrage - Milieu très agressif ≥ 5 cm - Milieu moyennement agressif ≥ 3 cm - Milieu peu agressif ≥ 3 cm - Milieu non agressif ≥ 1 cm	$D < c$
r : rayon moyen des mailles du ferrailage $r = \frac{ab}{2(a+b)}$ 	Granulat roulé $D \leq 1,4r$
	Granulat concassé $D \leq 1,2r$
h_m : épaisseur minimale de la pièce à bétonner	$D \leq \frac{h_m}{5}$
R : rayon moyen du moule	$D \leq 1,2R$ $D \leq R$

2.4. Dosage en ciment et en eau

2.4.1. Détermination approximative du dosage en ciment en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée

La formule approximative la plus utilisée est celle de Bolomey. Elle permet de fixer un rapport C/E en fonction de la résistance visée et de la classe vraie du ciment :

$$f_c = G \times \sigma_c (C/E - 0,5)$$

Où,

f_c : résistance moyenne en compression visée à 28 jours

C : dosage en ciment en kg/m³ de béton

E : dosage en eau totale sur matériaux secs en litres par mètre cube de béton

σ_c : classe vraie du ciment à 28 jours en MPa*

G : coefficient granulaire sans dimension (Tab.3.d)

(*) Remarque

La classe vraie σ_c d'un ciment correspond à la moyenne des résistances commerciales obtenues sur un mortier de référence composé à partir du ciment à caractériser (formulation et essais respectant la norme NF-EN 196.1). Cette classe peut généralement être évaluée comme la classe de résistance commerciale à laquelle on ajoute 20 % ou 15 % pour les mêmes raisons que pour la détermination de la résistance moyenne en compression du béton. Trois classes commerciales de résistances sont définies :

- Classe commerciale 32,5 → Classe estimée à 39 MPa
- Classe commerciale 42,5 → Classe estimée à 51 MPa
- Classe commerciale 52,5 → Classe estimée à 63 MPa

En réalité, seul le fournisseur peut donner une évaluation de la classe vraie du ciment. Cette valeur correspond à la moyenne des résultats des essais de compression réalisés à partir d'éprouvettes (4 x 4 x 16) cm, testées en flexion conformément à la norme NF-EN-197-1.

Tableau 3.d: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 12,5	20 ≤ D ≤ 31,5	D ≥ 50
	Fins	Moyens	Gros
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Les valeurs de G ci-dessus correspondent à des bétons de plasticité courante, c'est-à-dire, des bétons ayant un affaissement compris entre 4 et 9 cm.

Connaissant le rapport C/E (par application de la formule de Bolomey), l'abaque de la figure ci-dessous permet de déterminer la quantité d'eau nécessaire en fonction de l'ouvrabilité désirée (identifiée à partir de l'affaissement au cône).

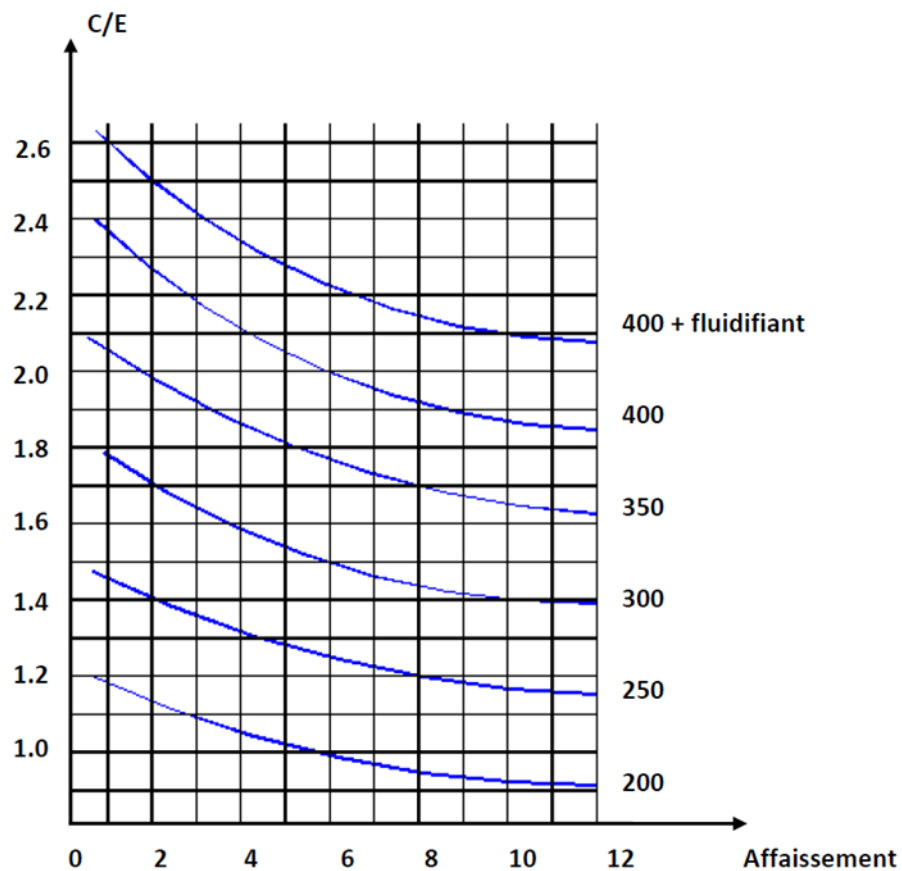


Figure 1.d : Dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E

Le tableau suivant, donné à titre indicatif, présente les dénominations d'affaissement selon la norme NF-EN-206.

Tableau 4.d: Affaissement au cône d'Abrams en fonction de la plasticité ciblée

Plasticité	Serrage	Affaissement (cm)
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9
Béton mou	Piquage	10 à 13
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14

L'abaque de la Figure 1.d est à double entrée : en abscisse la valeur de l'affaissement ciblé et en ordonnée le rapport C/E. Il permet d'évaluer approximativement le dosage en ciment en kg. Une fois le dosage en ciment C connu, on en déduit le dosage approximatif en eau totale à prévoir. Cette quantité d'eau est, bien sûr, ajustée par des essais de plasticité et d'ouvrabilité.

À titre d'exemple, pour obtenir un béton dosé à 350 kg de ciment avec un rapport $C/E = 1,8$, il faut une quantité d'eau égale à :

$$E = C/1,8 = 350/1,8 = 194,5 \text{ kg d'eau}$$

$$E = 194,5 \text{ litres}$$

Remarque

Le dosage en ciment est limité à 400 kg/m³ de béton en place. Au-delà, le ciment et l'eau seraient en trop forte concentration. Cette concentration risque de provoquer des fissures de retrait dans le béton. Pour cette raison, lorsqu'un rapport C/E et une ouvrabilité exigent plus de 400 kg de ciment pour 1 m³ de béton, il faut ajouter un fluidifiant.

Par exemple, pour réaliser un béton dosé à 400 kg de ciment avec un rapport C/E = 2 et un affaissement désiré de 10 cm, il faut une quantité d'eau égale à $400/2 = 200$ litres. Or, pour C/E = 2 et C = 400 kg, l'abaque donne une ouvrabilité de 6 cm : le béton obtenu est trop ferme et ce n'est pas le résultat recherché. Pour parvenir à une ouvrabilité de 10 cm, il faut donc ajouter un fluidifiant.

2.4.2. Correction du dosage en ciment en fonction de D

L'eau doit humidifier tous les grains du mélange. Par conséquent, la quantité nécessaire dépend du diamètre des grains à mouiller : plus le diamètre est petit, et plus la quantité d'eau augmente.

L'abaque précédent (Fig.1.d) est spécifique aux bétons pour lesquels la dimension maximale des granulats est égale à 25 mm. Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer. Le tableau ci-dessous fournit la correction à apporter sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale *D* du granulat.

Tableau 5.d : Correction sur le dosage en eau

Diamètre (mm)	5	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	100
Correction (%)	+15	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6	-8	-12

À titre d'exemple, pour un mélange granulaire de diamètre *D* = 16 mm, il faut majorer le dosage en eau de 4 %. Cela veut dire que, si un dosage initial réclame 194,5 litres d'eau, l'augmentation correspondante serait égale à :

$$E = 194,5 \times 1,04 = 202,28 \text{ litres} \rightarrow 7,78 \text{ litres d'eau en plus}$$

2.5. Dosage des granulats

2.5.1. Tracé de la courbe granulaire de référence

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable et de gravier permettant d'obtenir un squelette granulaire avec un minimum de vide.

L'étude des mélanges granulaires montre que quel que soit le mélange (sable + gravillon + gravier), le tracé de la courbe peut être représenté approximativement par deux segments de droite (OA et AB), représentation simplifiée de la courbe granulaire réelle du mélange (Fig.2.d).

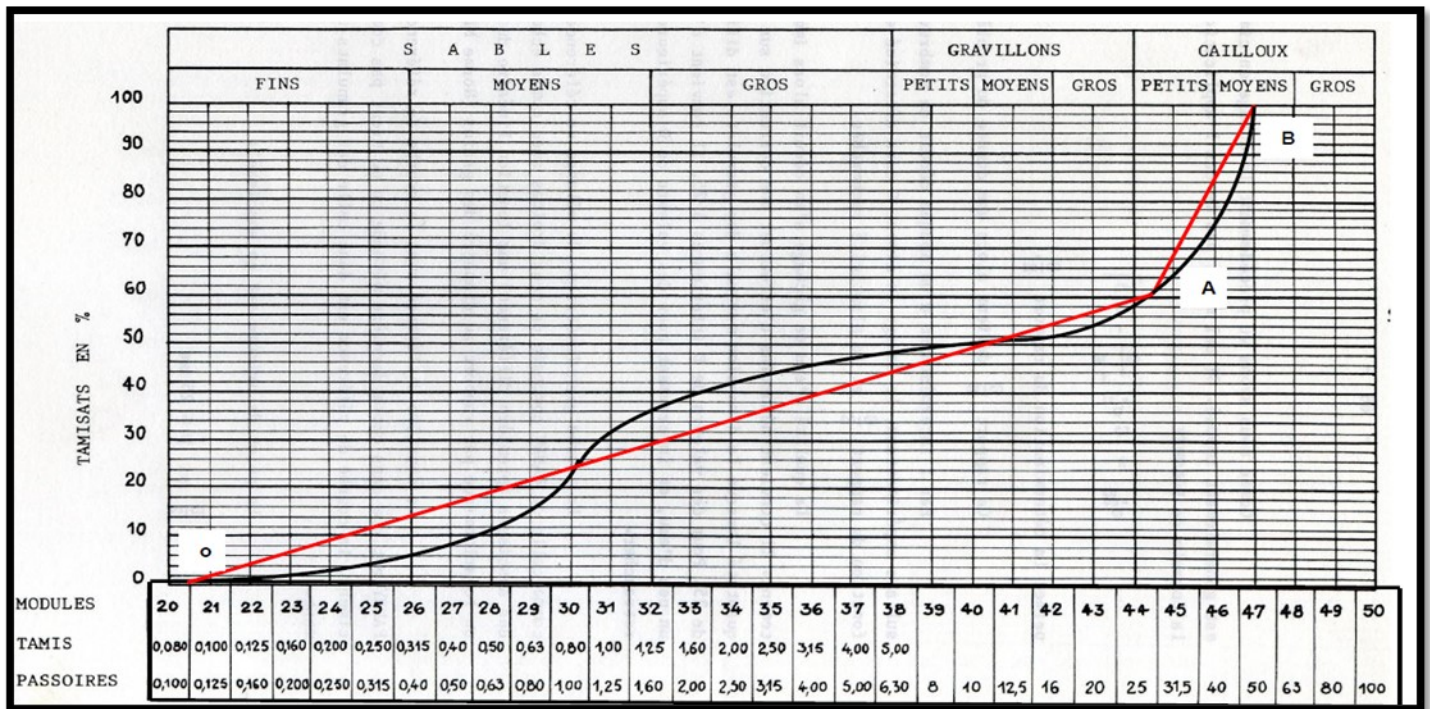


Figure 2.d: Composition granulaire de référence

Où,

— : composition granulaire réelle du béton

— : composition granulaire de référence

O : origine

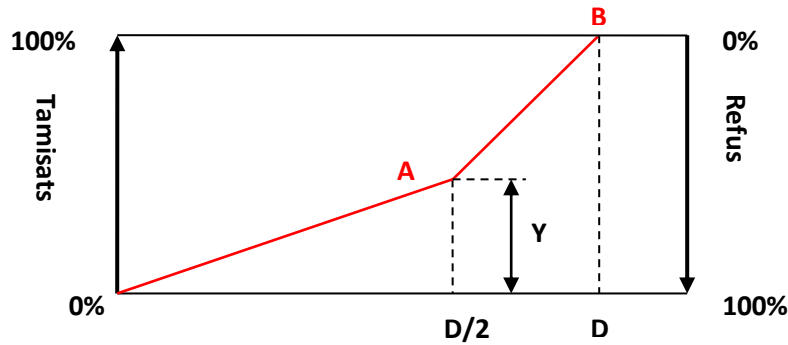
A : point de brisure

B : extrémité

L'examen d'un grand nombre de tracés granulaires montre, que pour les granulats à béton, les points O et B sont invariables quel que soit les proportions du mélange, et ont pour coordonnées :

- O (0,080 mm, 0 %)
- B (D, 100 %)

Pour le point de brisure A, il se situe en moyenne entre le module 38 et le module correspondant au diamètre maximal des granulats D.



L'approche proposée par Dreux pour le tracé de la courbe granulaire de référence est la suivante :
 Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace une composition granulaire de référence OAB.
 C'est une courbe composée de deux segments de droite OA et AB, de coordonnées :

$$\text{Point O} \rightarrow \begin{cases} X_0 = 0,080 \text{ mm} \\ Y_0 = 0 \% \end{cases}$$

$$\text{Point B} \rightarrow \begin{cases} X_B = D \\ Y_B = 100 \% \end{cases}$$

$$\text{Point A} \rightarrow \begin{cases} X_A = D/2 \text{ si } D \leq 20 \text{ mm} \rightarrow X_A = \text{milieu du segment limité par les tamis 5 mm et } D \text{ si } D > 20 \text{ mm} \\ Y_A = 50 - \sqrt{D} + k' \end{cases}$$

Où,

$k' = k + k_s + k_p$ = termes correcteurs supplémentaires pour tenir compte de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration, de la finesse du sable et de la mise en œuvre du béton.

k : terme correcteur permettant d'optimiser la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats et du dosage en ciment (Tab.6.d).

Tableau 6.d : Valeur du terme correcteur k

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

k_s : terme correcteur qui tient compte de la granularité du sable, donc du module de finesse

$$k_s = 6 \text{ MF} - 15$$

Le module de finesse du sable est compris entre 2 et 3 avec une valeur optimale voisine de 2,5, il n'y a pas de correction pour $\text{MF} = 2,5$ ($k_s = 6 \times 2,5 - 15 = 0$).

k_p : terme correcteur permettant de réajuster le dosage en sable dans le cas d'un béton pompé afin de faciliter le transfert de ce dernier (béton enrichi en sable par rapport à un béton courant).

$k_p = 0 \rightarrow$ béton non pompé

$k_p = 5$ à 10 (selon la plasticité désirée) $\rightarrow$ béton pompé

À titre d'exemple, pour préparer un mètre cube de béton non pompé dosé à 350 kg de ciment, on utilise des granulats concassés de diamètre maximal $D = 16$ mm, un sable avec un module de finesse $MF = 2,7$ et une puissante vibration. Ces conditions donnent :

$k_p = 0$ (béton non pompé)

$k_s = 6 \times 2,7 - 15 = 1,2$

$k = 0$ (granulat concassé et vibration puissante)

La correction à apporter sur l'ordonnée du point de brisure Y_A est :

$k' = 1,2$

2.5.2. Pourcentage de granulats

La courbe granulaire de référence OAB est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats du béton à formuler (Fig.3.d). Les pourcentages de sable et de gravillon sont obtenus en traçant la ligne de partage entre les granulats qui joint les points suivants :

- M : point de la courbe granulométrique du sable pour un tamisât de 95 %
- N : point de la courbe granulométrique du gravier pour un tamisât de 5 %

La droite de partage MN coupe la courbe de référence en I. Le point d'intersection I entre ces deux droites de partage et la courbe de référence détermine les pourcentages en volume absolu des différents granulats (cas d'un béton binaire).

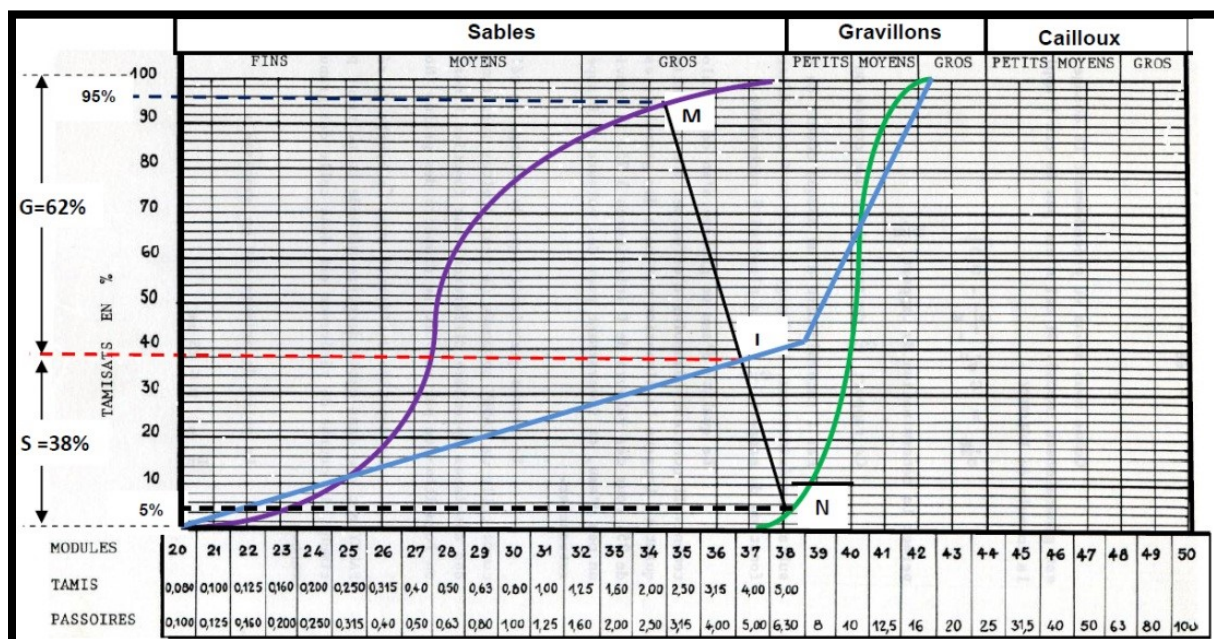


Figure 3.d : Tracé des lignes de partage

2.5.3. Coefficient de compacité γ

Les grains solides ne remplissent pas la totalité du volume de béton à cause de la présence d'eau interstitielle et de poches d'air. Pour évaluer la masse des granulats, il faut donc déterminer la compacité du béton γ (rapport du volume absolu des matières solides au volume total de béton frais) :

$$\gamma = \frac{V_{abs}}{V_{app}} = \frac{V_{ms}}{1000} \rightarrow V_{abs} = V_G + V_S + V_C$$

γ dépend du diamètre des granulats, des conditions de vibration et de la plasticité (Tab.7.d).

Tableau 7.d : Compacité du béton en fonction de D et du mode de serrage

Plasticité	Vibration	γ coefficient de compacité (granulat roulé et C = 350 kg/m³)					
		D = 5	D = 8	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 40
10 ≤ A ≤ 15 (molle)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815
	Faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820
	Normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825
5 ≤ A ≤ 9 (plastique)	Faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,832
	Normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835
	Puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840
0 ≤ A ≤ 4 (ferme)	Faible	0,755	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840
	Normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845
	Puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850
Correction sur γ	- 0,01 (sable roulé, gravillon concassé)				- 0,03 (granulats légers)	$\frac{(C - 350)}{5000}$ (en fonction du dosage en ciment)	
	- 0,03 (sable et gravillon concassés)						

2.5.4. Dosage en masse des composants du béton

Le volume total des granulats V_{abs} et les pourcentages en volume absolu de sable $S\%$, de gravillon $g\%$ et de gravier $G\%$ connus (cas d'un béton ternaire), le volume de chacun des granulats est donc :

- $V_S = V_{abs} \times S\% \rightarrow M_S = V_{abs} \times S\% \times \rho_{S,abs}$
- $V_g = V_{abs} \times g\% \rightarrow M_g = V_{abs} \times g\% \times \rho_{g,abs}$
- $V_G = V_{abs} \times G\% \rightarrow M_G = V_{abs} \times G\% \times \rho_{G,abs}$

Où,

$$V_{abs} = V_G + V_g + V_S = 1000 \gamma - V_C$$

C : dosage en ciment en kg/m^3

$$V_C = C/\rho_C$$

ρ_C : masse volumique absolue en kg/m^3

Masse totale d'un mètre cube de béton :

$$M = M_S + M_g + M_G + M_C + M_E$$

Densité théorique d'un mètre cube de béton frais :

$$\Delta_0 = \frac{M_C + M_S + M_g + M_G + M_E}{1000}$$

Remarques

1) Comme toute autre composition, le résultat obtenu doit être vérifié par une gâchée d'essai afin de corriger (si c'est nécessaire) le dosage en eau et la masse volumique du béton.

2) La masse volumique du béton dépend des granulats utilisés. Elle avoisine :

- 2150 à 2550 kg/m³ pour les bétons ordinaires,
- 1350 à 1850 kg/m³ pour les bétons légers,
- 3200 à 3700 kg/m³ pour les bétons lourds, mais peut atteindre 5300 kg/m³ pour les bétons utilisés comme écran de protection (radiations nucléaires, rayons X, etc.), mais aussi comme contrepoids.

3) Un béton courant a une masse volumique d'environ 2400 kg/m³, ce qui correspond à un poids unitaire de 23,5 kN/m³ (l'acier augmente le poids unitaire du béton armé, il pèse environ 77 kN/m³).

2.6. Application

2.6.1. Données

Il s'agit de déterminer la composition d'un béton composé d'un sable 0/5, d'un gravillon 3/8 et d'un gravier 8/15 par la méthode de Dreux en utilisant les éléments suivants :

- Partie d'ouvrage : Poutre (Fig.4.d)
- Consistance : Béton plastique
- Type de vibration : Vibrations moyennes + piquage
- Classe de ciment : CPJ - CEMII/B32.5R ($\sigma_c = 45$ MPa, $\rho_c = 3,1$ t/m³)
- Nature des granulats : Concassés, de qualité passable
- Masse volumique absolue des granulats : $\rho_{abs,s,g,G} = 2,6$ t/m³
- Masse volumique apparente des granulats : $\rho_{app,s,g,G} = 1,6$ t/m³
- Résistance moyenne à la compression à 28 jours : $f_{c28} = 22$ MPa
- Plasticité (affaissement au cône d'Abrams) : $A_{aff} = 9$ cm

2.6.2. Travail demandé

À partir des courbes granulométriques des granulats (Fig.5.d) :

1. Vérifier la dimension maximale des granulats
2. Calculez le rapport C/E à partir de la formule de Bolomey
3. Corrigez le dosage en eau en fonction de D
4. Calculez le module de finesse du sable
5. Tracez la courbe de référence OAB
6. Donnez les pourcentages des granulats (sable%, gravillon%, gravier%)
7. Calculez le coefficient de compacité Y
8. À partir des pourcentages de chaque granulat, calculez les volumes absolus de sable, de gravillon et de gravier
9. Et en vous basant sur les résultats obtenus (essais sur béton frais et sur béton durci), apportez les corrections nécessaires.

2.6.3. Caractéristiques de la pièce à bétonner

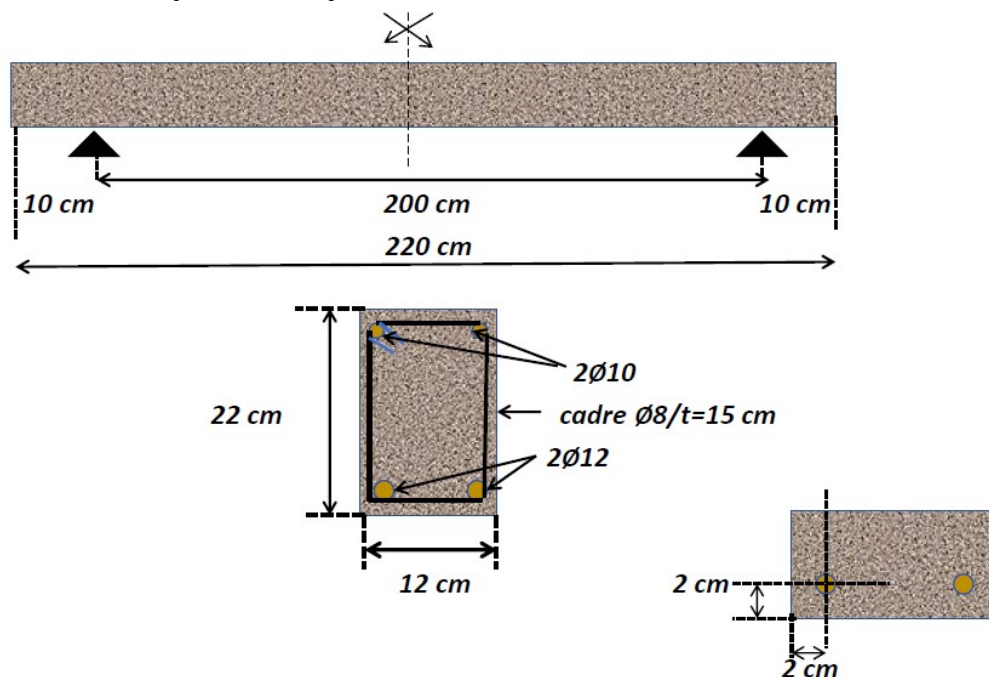


Figure 4.d : Caractéristiques de la poutre à bétonner

2.6.4. Résultats

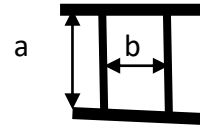
2.6.4.1. Vérification de la dimension maximale des granulats D

La vérification de D porte sur l'enrobage des aciers c , l'espacement entre les armatures longitudinales e_h , le rayon du moule R et le rayon moyen du ferrailage r .

1. Rayon moyen des mailles de ferrailage r

$$r = \frac{a \times b}{2(a+b)} = \frac{8 \times 15}{2(8+15)} = 26 \text{ mm}$$

$$r = 26 \text{ mm}$$



2. Rayon moyen du moule R

En pratique, pour la détermination de R , le volume du moule à prendre en considération, n'est pas celui de la pièce complète mais uniquement de ses parties les plus ferrillées. Soit :

$$R = \frac{2c \times b \times L}{(bL) + 2(2cL) + 2(2cb) + 2\pi\Phi L} = \frac{2 \times 2 \times 12 \times 220}{(12 \times 220) + 2(2 \times 2 \times 220) + 2(2 \times 2 \times 12) + 2 \times 3,14 \times 12 \times 220} = 17,6 \text{ mm}$$

$$R = 17,6 \text{ mm}$$

3. Détermination de D (Tab.2.d)

$$D \leq e_h/1,5 = 8/1,5 = 5,33 \text{ cm}$$

$$D \leq 1,2 r = 1,2 \times 2,6 = 3,12 \text{ cm}$$

$$D \leq h_m/5 = 12/5 = 2,4 \text{ cm}$$

$$D \leq c' = 1,4 \text{ cm}$$

$$D \leq R = 1,76 \text{ cm}$$

→ Diamètre maximal $D \leq 14 \text{ mm}$ → On prend $D = 14 \text{ mm}$

2.6.4.2. Dosage en ciment

À partir de la résistance moyenne à la compression, on utilise la règle approximative pour fixer la résistance moyenne ciblée :

$$f_{cm} = f_{C28} + 15 \% = 22 + 15 \% = 25,3 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 25,3 \text{ MPa}$$

Le dosage en ciment est obtenu en utilisant la formule de Bolomey :

$$f_{cm} = G \times \sigma'_c (C/E - 0,5) \rightarrow \begin{cases} G = 0,35 \text{ (granulats de qualité passable)} \\ \sigma'_c = 45 \text{ MPa} \\ f_{cm} = 25,3 \text{ MPa} \end{cases}$$

Ce qui donne :

$$25,3 = 0,35 \times 45 (C/E - 0,5) \rightarrow C/E = 1,9$$

À partir de l'abaque de la Figure 1.d, pour $C/E = 1,9$ et $A_{aff} = 9 \text{ cm}$, on trouve :

$$C = 400 \text{ kg}$$

2.6.4.3. Dosage en eau

Sur des matériaux secs, le dosage en eau totale est approximativement égal à :

$$\frac{400}{1,9} = 210,5 \text{ litres}$$

E = 210,5 litres (si D = 25 mm)

Pour D = 14 mm, le dosage en eau totale est majoré d'à peu près 5 %, ce qui donne :

$$E = 210,5 \times 1,05 = 221 \text{ litres}$$

E = 221 litres

2.6.4.4. Module de finesse

Le sable entrant dans la composition du béton à un module de finesse égal à (Fig.5.d):

$$D = 0,16 \text{ mm} \dots\dots\dots 93,6\%$$

$$D = 0,315 \text{ mm} \dots\dots\dots 81,5\%$$

$$D = 0,63 \text{ mm} \dots\dots\dots 59,1\%$$

$$D = 1,25 \text{ mm} \dots\dots\dots 38,3\%$$

$$D = 2,5 \text{ mm} \dots\dots\dots 17,3\%$$

$$D = 5 \text{ mm} \dots\dots\dots 1,2\%$$

$$\text{Total} = 291 \rightarrow \text{MF} = 2,91$$

MF = 2,91 → Bon sable à béton : pas besoin de correction

2.6.4.5. Tracé de la courbe granulaire de référence OAB

La courbe du mélange granulaire de référence est tracée sur le graphique des courbes granulométriques des différents granulats. Elle a pour coordonnées (Fig.5.d) :

$$\text{Point O} \rightarrow \begin{cases} x_0 = 0,080 \text{ mm} \\ y_0 = 0 \% \end{cases}$$

$$\text{Point B} \rightarrow \begin{cases} x_B = D = 14 \text{ mm} \\ y_B = 100 \% \end{cases}$$

$$\text{Point A} \rightarrow \begin{cases} x_A = D/2 = 14/2 = 7 \text{ mm (D < 20 mm)} \\ y_A = 50 - \sqrt{D} + k' \text{ (} k' = k + k_s + k_p \text{)} \end{cases}$$

Pour un dosage à 400 kg, des granulats concassés, un module de finesse de 2,91 et une vibration normale, on peut choisir les termes correcteurs suivants :

- $k = 0$
- $k_p = 0$ (béton non pompé)
- $k_s = 6 \text{ MF} - 15 = 2,46$ (ajustement de la granularité du sable pour $\text{MF} \neq 2,5$)

La correction à apporter sur l'ordonnée du point de brisure y_A est :

$$k' = 2,46$$

$$y_A = 50 - \sqrt{D} + 2,46 = 48,58 \% \approx 48,72 \%$$

$$y_A = 48,72 \%$$

ANALYSE GRANULOMETRIQUE NF P 18-560

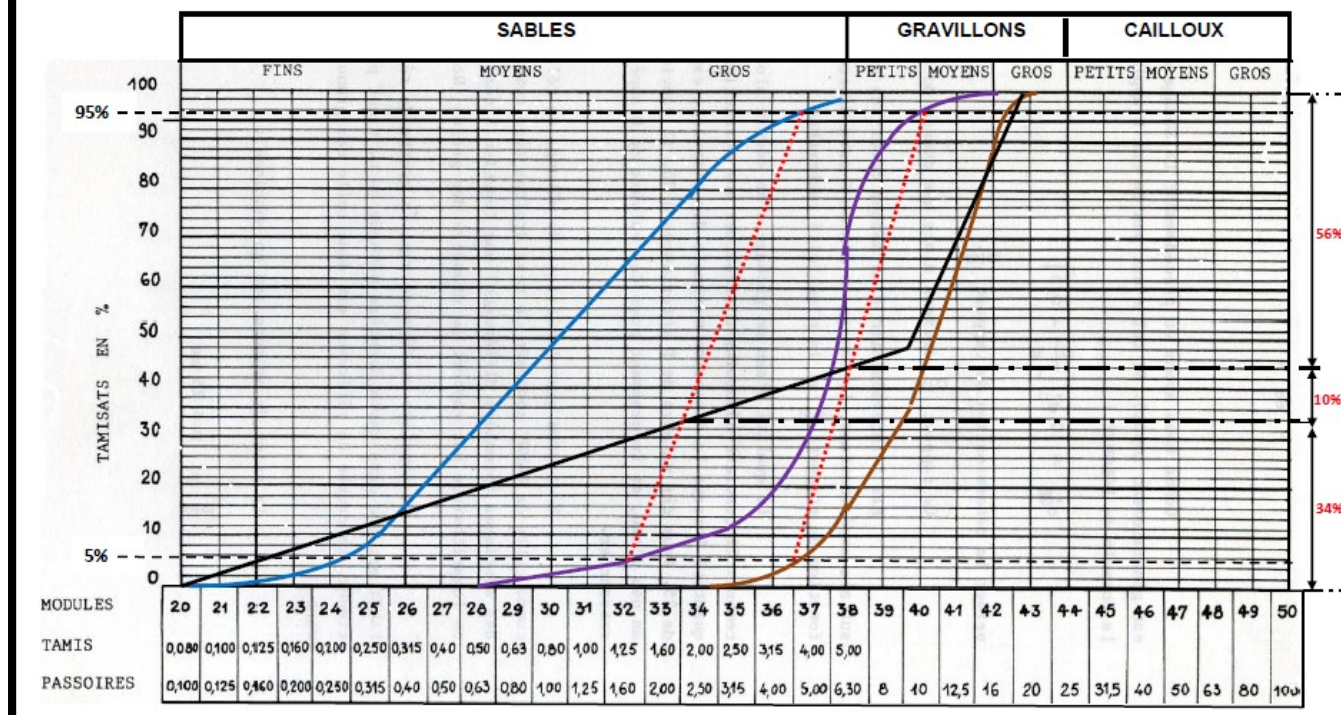


Figure 5.d : Courbes granulométriques + courbe granulaire de référence + lignes de partage

2.6.4.6. Pourcentage des granulats

Les lignes de partage entre les granulat s'obtiennent en joignant les points 95 % et 5 % des courbes successives (sable, gravillon, gravier). À partir de ce tracé (Fig.5.d), on obtient les pourcentages suivants :

- Sable 0/5 : 34 %
- Gravel 3/8 : 10 %
- Gravier 5/15 : 56 %

Les pourcentages relevés graphiquement se rapportent aux volumes absolus des granulat.

2.6.4.7. Coefficient de compacité Y

Si V_c , V_s , V_g , V_G représentent les volumes en litres du ciment et des granulat contenus dans un mètre cube de béton frais, ils ne remplissent pas la totalité des 1000 litres à cause de la présence d'eau interstitielle et de bulles d'air. Pour cette raison, pour calculer le volume des constituants du béton, on commence par ressortir un coefficient de compacité γ à partir du Tableau 7.d. Ce dernier donne : $\gamma = 0,825$ pour des granulat roulés et un dosage de 350 kg de ciment.

Des corrections s'imposent étant donné que les granulat utilisés dans cette formulation sont concassés avec un dosage en ciment de 400 kg. Ces corrections sont :

$$\frac{C - 350}{5000} = 0,01$$

$$\gamma = 0,825 - 0,03 \text{ (granulats concassés)} + 0,01 \text{ (dosage } c = 400) = 0,80$$

$$\gamma = 0,805$$

2.6.4.8. Dosage des granulats

$$\gamma = \frac{V_{abs}}{V_{app}} = \frac{V_{ms}}{1000} \rightarrow V_{abs} = V_c + V_s + V_g + V_G$$

Les volumes absolus des constituants sont :

- Volume total absolu : $1000 \gamma = 805$ litres
- Volume absolu du ciment : $400/3,1 \approx 129$ litres
- Volume absolu des granulats : $805 - 129 = 676$ litres
- Volume absolu du sable : $676 \times 0,34 = 229,84$ litres
- Volume absolu du gravillon : $676 \times 0,10 = 67,6$ litres
- Volume absolu du gravier : $676 \times 0,56 = 378,56$ litres

Sachant que la densité absolue des granulats est égale à 2,6, les dosages en matériaux secs sont :

- Sable : $229,84 \times 2,6 \approx 598$ kg
- Gravillon : $67,6 \times 2,6 = 176$ kg
- Gravier : $378,56 \times 2,6 = 984$ kg
- Ciment : 400 kg
- Eau : 221 kg

Total : 2379 kg pour un mètre cube de béton

$\Delta_0 = 2,379$ (densité théorique)

2.6.5. Correction de la composition

La formulation théorique du béton étant établie, il reste maintenant à la tester par quelques essais d'études et d'y apporter éventuellement les corrections nécessaires en laboratoire avant d'être utilisée sur chantier.

2.6.5.1. Correction de la composition en fonction de la teneur en eau avant la préparation

La composition théorique du béton est déterminée en supposant que les granulats sont secs. Il est donc nécessaire de prendre en considération l'eau contenue dans ces derniers avant la préparation du béton. La teneur en eau des granulats est égale à :

$$\omega = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse sèche}}$$

À défaut de mesure précise, on peut déterminer l'eau contenue dans les granulats en nous aidant du tableau suivant :

Tableau 8.d : Quantité d'eau contenue dans les granulats en fonction du degré d'humidité

Degré apparent d'humidité	Eau d'apport (litre/m ³ de matériau)			
	Sable 0/5	Gravillon 5/12,5	Gravier 5/20	Gravier 16/31,5
Apparence sèche	0 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
Apparence humide	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
Apparence très humide	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
Apparence saturée	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

2.6.5.2. Correction de la composition après des essais en laboratoire

Par rapport aux résultats obtenus en laboratoire, les corrections à apporter sur les constituants du béton sont :

- Ajustement de la quantité d'eau en fonction de l'affaissement au cône d'Abrams.
- Ajustement de la quantité de granulats à partir de la masse volumique réelle du béton Δ .
- Correction sur le dosage en ciment après les essais sur béton durci.

1. Plasticité : Correction sur l'eau

Pour vérifier si la formulation conduit bien à l'affaissement désiré (ici 9 cm), il faut effectuer quelques essais au cône d'Abrams. Si l'affaissement obtenu est différent de celui visé, la correction sur le volume d'eau se fait en s'aidant de l'abaque de la figure ci-dessous.

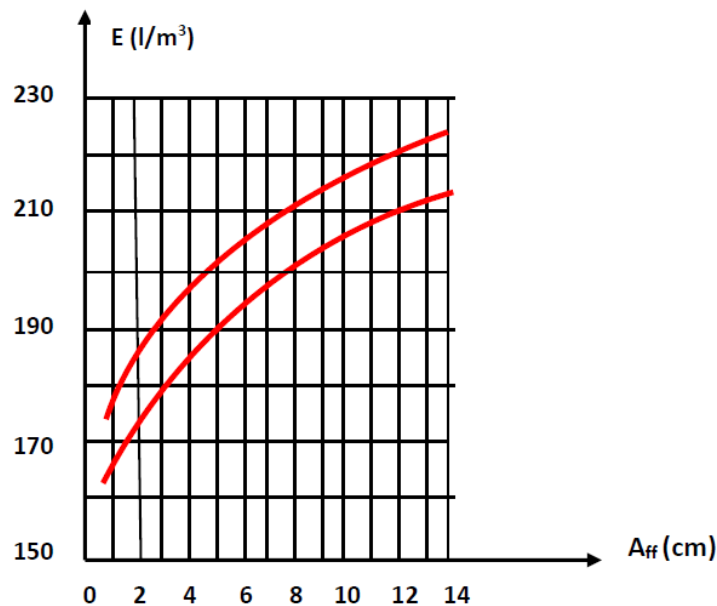


Figure 6.d : Variation du volume d'eau en fonction de l'affaissement

À titre d'exemple, si le dosage prévu (ici, 221 litres) donne en réalité un affaissement trop fort, comme 13 cm. Par conséquent, il faut diminuer le dosage en eau si on veut atteindre l'affaissement ciblé (9 cm). Le volume d'eau corrigé est obtenu en procédant comme ce qui suit (Fig.7.d) :

- Sur le graphe de la figure ci-dessus, placer le point ayant pour coordonnées $E_{\text{utilisée}}$ et $A_{\text{ff,obtenu}}$.
- Par ce point, faire passer une courbe homothétique aux deux existantes (si ce point ne se trouve pas sur une des deux courbes).
- À partir de l'affaissement visé en déduire le volume d'eau à utiliser $E_{\text{corrigée}}$.

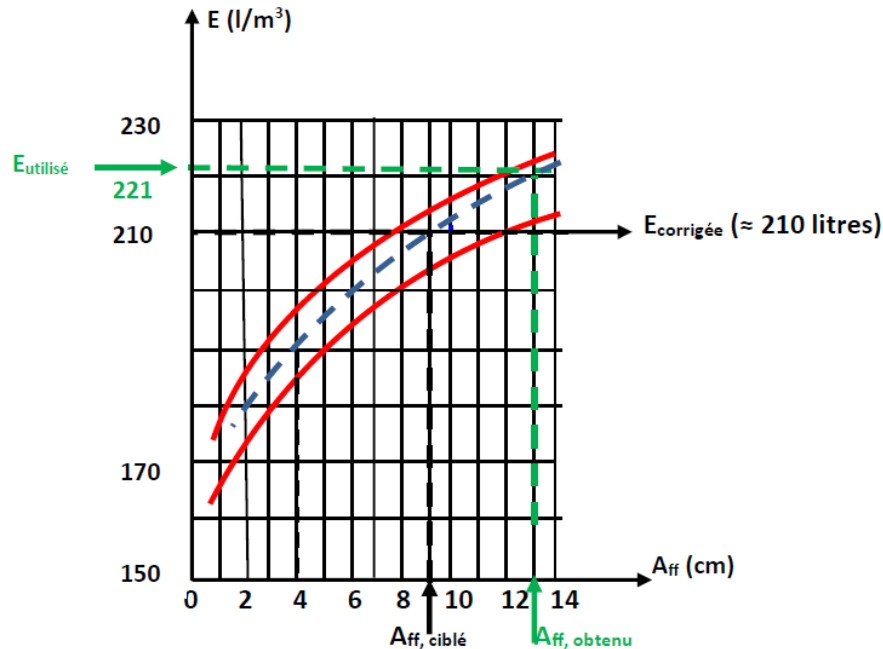


Figure 7.d : Exemple de correction du volume d'eau

Il faut donc diminuer la quantité d'eau si on veut atteindre l'affaissement ciblé, soit à peu de 11 litres.

2. Ajustement au mètre cube : Correction sur les masses des granulats

Si la masse volumique réelle du béton frais Δ est différente de la masse volumique théorique Δ_0 de la formulation, cela veut dire, qu'il y a soit un surdosage, soit un sous dosage en ciment. Autrement dit, la composition étudiée ne correspond pas à un mètre cube de béton : une correction sur la masse totale des granulats s'impose.

La correction se fait comme ce qui suit :

- Peser quelques éprouvettes de béton frais (confectionnées conformément aux normes de contrôle).
- Déduire la densité réelle Δ du béton.

Si Δ est différente de la densité théorique Δ_0 (ici, 2,379), il faut apporter une correction sur le poids des granulats.

Supposons que la pesée des éprouvettes a donné une densité réelle $\Delta = 2,50$. La correction sera donc :
 $x = 1000 (2,50 - 2,379) = +121$ kg de granulats

Ce qui donne,

- $121 \times 34 \% = 41,14 \text{ kg} \approx 41 \text{ kg de sable}$
- $121 \times 10 \% = 12,1 \text{ kg} \approx 12 \text{ kg de gravillon}$
- $121 \times 56 \% = 67,76 \text{ kg} \approx 68 \text{ kg de gravier}$

3. Résistance : Correction sur le dosage en ciment

Pour les essais sur béton durci, il faut confectionner des éprouvettes avec un béton corrigé, c'est-à-dire, avec les quantités suivantes :

- Sable : $598 + 41 = 639 \text{ kg}$
- Gravillon : $176 + 12 = 188 \text{ kg}$
- Gravier : $984 + 68 = 1052 \text{ kg}$
- Ciment : 400 kg
- Eau corrigée : $221 - 11 = 210 \text{ kg}$

Total = 2489 kg

Supposant maintenant que les résultats d'écrasement donnent une résistance moyenne nettement supérieure à celle ciblée, par exemple 40 MPa au lieu de 25,3 MPa.

Pour corriger, on peut éventuellement réduire le dosage en ciment sachant que le rapport 25,3/40 a une influence sur le terme $(C/E - 0,5) = (1,9 - 0,5) = 1,4$

Le terme corrigé est :

$$(C/E - 0,5) = \frac{25,3}{40} \times 1,4 = 0,8855 \approx 0,9 \rightarrow C/E = 0,9 + 0,5 = 1,4$$

La Figure 1.d donne pour $C/E = 1,4$ et un affaissement de 9 cm un dosage en ciment égal à 300 kg. Il faut donc revoir le dosage pour réduire la résistance.

Remarque

En augmentant ou en diminuant le dosage en ciment (ΔC), on augmente ou on diminue le dosage en éléments fins au profit des éléments plus gros. Par conséquent, pour conserver la même maniabilité du béton, il est nécessaire de diminuer ou d'augmenter le volume absolu de sable ΔV_S pour compenser la variation du volume absolu du ciment ΔV_C . Ceci conduit donc à une dernière correction sur le sable, qui est :

$$S_{\text{Corrigé}} = S + \Delta S$$

Et, sachant que $\Delta C = C_{\text{Corrigé}} - C_{\text{réel}}$, il vient :

- $\Delta V_C = \frac{C_{\text{Corrigé}} - C_{\text{réel}}}{\rho_{\text{abs,c}}}$
- $\Delta V_S = -\Delta V_C = -\frac{C_{\text{Corrigé}} - C_{\text{réel}}}{\rho_{\text{abs,c}}}$

On remplace donc les 100 kg de ciment soustrait par une masse de sable équivalente en volume absolu. Ce qui donne le dosage suivant :

$$\frac{100 \times 2,6}{3,1} = 83,87 \text{ kg} \approx 84 \text{ kg}$$

On obtient après les dernières corrections, la composition suivante :

- Sable : $639 + 84 = 723$ kg
- Gravillon : 188 kg
- Gravier : 1052 kg
- Ciment : 300 kg
- Eau corrigée (à peu près) : $300/1,4 = 214$ kg

Total = 2477 kg $\rightarrow \Delta_0 \approx 2,48$ (densité théorique)