Formulation de béton

Méthode pratique pour la composition du béton (DREUX-GORISSE)

Nous rappelons que cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudier, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées.

1. Données de base

1.1. Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferraillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale des éléments et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferraillées : distance minimale entre elles et couverture par rapport au coffrage.

1.2. Résistance souhaitée

σ'_{28} La résistance en compression à 28 jours visés.

1.3. Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferraillé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée par affaissement au cône comme indiqué au tableau 1.

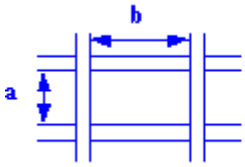
Tableau 1 : *évaluation de l'ouvrabilité*

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	Nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	**Vibration puissante**	0 à 2	>60
Béton ferme	**Bonne vibration**	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	**Vibration courante**	6 à 9	15 à 25
Béton mou	**Piquage**	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	**Léger piquage**	≥ 14	< 10

1.4. Dimension maximale des granulats

La dimension maximale des granulats ($_{Dmax)}$ est choisie suivant les spécificités de l'ouvrage à bâtir. Le tableau suivant montre les règles à suivre, en général ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandis que une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminué de 20% environ.

Tableau (2) : Dimension maximale du granulat.

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D_{max}
e_h	Espacement horizontal entre armatures horizontales	$\leq e_h / 1,5$
e_v	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$\leq e_v$
d	Enrobages des armatures : Ambiance très agressive ≥ 5 cm Ambiance moyennement agressive ≥ 3 cm Ambiance peu agressive ≥ 3 cm Ambiance non agressive ≥ 1 cm	< d
r	Rayon moyen du ferraillage  $r = \frac{a\,b}{2\,(a+b)}$ Granulats roulés Granulats concassés	≤ 1,4 r ≤ 1,2 r
h_m	Hauteur ou épaisseur minimale	$\leq h_m / 5$

1.5. Dosage en ciment :

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée $\boldsymbol{\sigma'_{28}}$

$$\sigma'_{28} = G\sigma'_c(\frac{C}{E} - 0.5)$$

Avec :

$\boldsymbol{\sigma'_{28}}$: Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en Mpa,

$$\boldsymbol{\sigma'_{28} = 1.15 \times fc'28}$$

$\boldsymbol{fc'\,28}$: la résistance à la compréssion désirée à 28 jours.

$\boldsymbol{\sigma'_c}$: Classe vraie du ciment (à 28 jours) en Mpa,

C : Dosage en ciment (en kg/m^3),

E : Dosage en eau totale sur matériau secs (en litre), **G** : Coefficient granulaire.

Tableau (3) : Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G)

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins	**Moyen**	**Gros**
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Le dosage en ciment est en fonction de C/E, mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure n°1 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

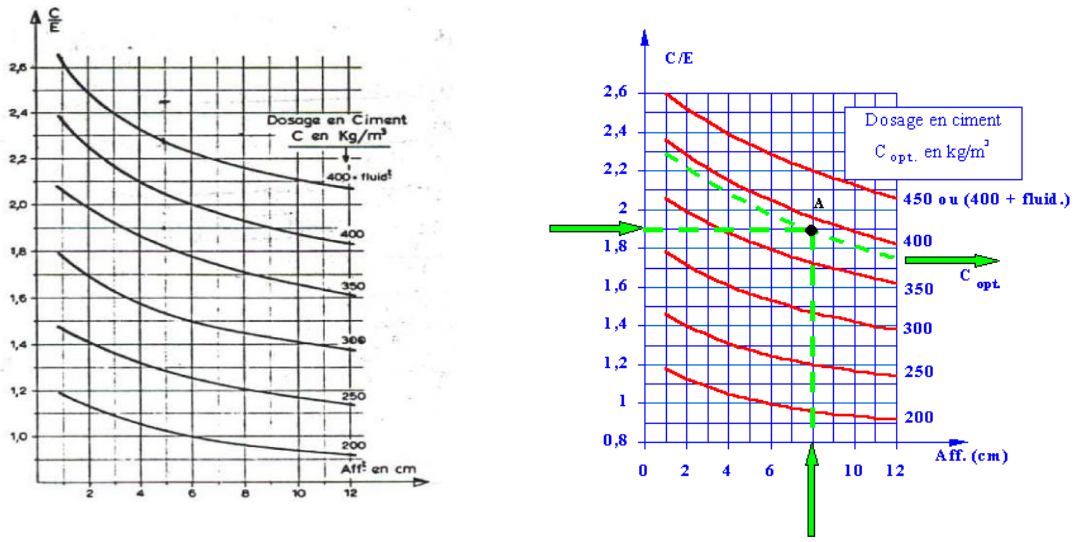


Figure 1 : *Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).*

1.6. Dosage en eau :

L'abaque de la figure (2), donne l'allure générale de la variation du dosage en eau en fonction de l'affaissement au cône et du test d'ouvrabilité C.E.S. Il ne s'agit bien entendu que d'ordre de grandeur pour des bétons courants et permettant de dégrossir rapidement une formule de composition mais comme pour tous les facteurs de cette composition c'est à notre avis par des essais sur des éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosée.

1.6.1. Correction du dosage en eau en fonction de Dmax

Les données précédents sont plus particulièrement applicables aux bétons dont la dimension maximale des granulats est d'environ D = 25 mm (dimension la plus courante). Si l'on a D < 25 mm, la surface spécifique des granulats augmente et à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice- versa. La correction sur le dosage en eau correspond à D = 25 mm, peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau (5) en fonction de D.

Tableau (5) : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats

Dimension maximale des granulats D en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction du dosage en eau (%).	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

1.6.2. Dosage en eau réelle :

La quantité d'eau totale (sur matériau supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, en obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats).

1.7. Analyses granulométriques des granulats

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace la courbe granulaire de référence OAB. - Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D des plus gros granulats.

- Point de brisure A à pour coordonnées :

- En abscisse Si D ≤ 25 mm X = D/2.

Si D > 25 mm X est située au milieu du segment limité par le Module 38 (5mm) et le module correspond à D ;

- En ordonnée :

$$\mathbf{Y = 50 - (D_{max})^{1/2} + K.}$$

Avec K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et également de module de finesse du sable. Les valeurs de K est donnée sur le tableau (6).

Tableau (6) : Valeurs de K

Vibration		**Faible**		**normale**		**Puissante**	
Forme des granulats		**Roulé**	**Concassé**	**Roulé**	**Concassé**	**Roulé**	**Concassé**
Dosage en ciment	**400+fluidif**	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+	+4	0	+	-2	0
	300	2	+6	+	2	0	+
	250	+	+8	2	+	+	2
	200	4	+1	+	4	2	+

Nota 1 : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera effectué de façon à relever le point A, ce qui correspond à augmenter le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur Ks = 6Mf – 15.

Nota 2 : Si la quantité du béton est précisée « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur Kp = +5 à +10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

1.8. Coefficient de compacité (γ) :

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matériaux solides (ciment et granulats) réellement contenus dans un mètre cube de béton frais en œuvre. On choisira une valeur approximative de (γ) dans le tableau (7) :

Tableau (7) : *Valeurs du coefficient de compacité :*

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		D=5	**D=10**	**D=16**	**D=25**	**D=40**	**D=63**	**D=100**
Molle	**Piquage**	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	**Piquage**	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	**Vibration faible**	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Nota : Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = **- 0.01** ;

- sable et gravier= **- 0.03**

- pour les granulats légers, on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de γ qui correspondant ici à des granulats denses ordinaires.

1.9. Dosage des granulats :

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur la même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants figure 3. La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe de sable au point 5% de la courbe du gravier. Le point de rencontre de ligne de partage avec la courbe de référence donne le partage des pourcentages de sable et de gravier.

%sable=36%

%gravier =64%

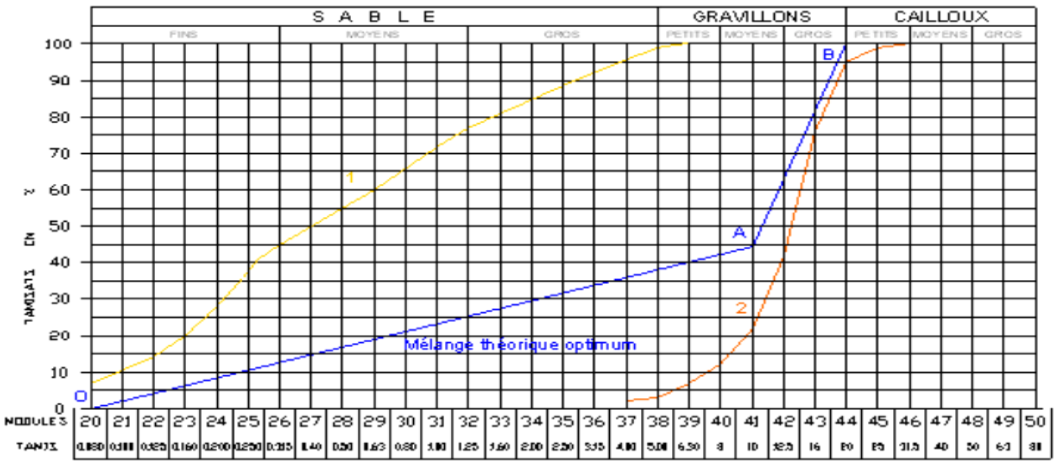


Figure 2 : *Courbe de référence (OAB) + courbes granulométrique du sable et gravier*

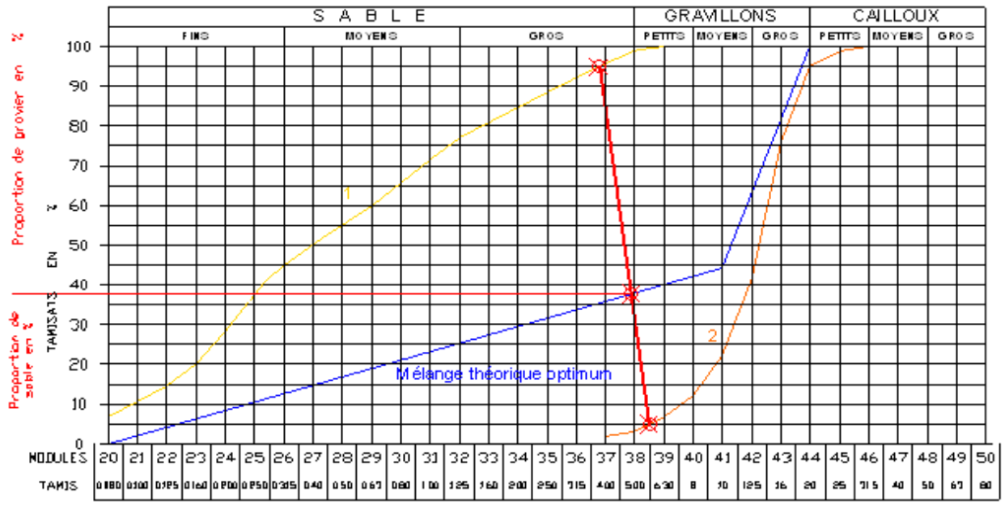


Figure 3 : *La ligne de partage*

Par exemple. Si C est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est :

$$\boldsymbol{\rho_{abs} = \frac{C}{v_1}} \qquad \boldsymbol{v_1 = \frac{C}{\rho_{abs}}}$$

$$\mathbf{V1 = C/3.1}$$

ρ_{abs} : Masse volumique absolue du ciment

V_1 : volume absolue du ciment

En admettant une masse spécifique de 3.1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise).

On choisira dans le tableau (7), une valeur convenable du coefficient de compacité γ en fonction de D, de la consistance et de l'efficacité du serrage.

Volume absolu des granulats sable et gravier V :

$$\mathbf{V= 1000\ \gamma\ - v1}$$

Si g_2, g_3 sont les pourcentages en volume absolu des granulats sable et gravier. Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$\mathbf{V2 = g2 .V}$$

$$\mathbf{V3 = g3 .V}$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ρ_2 ρ_3 les masses de chacun deux sont :

$$\mathbf{P2 = V2 .}\ \rho_2$$

$$\mathbf{P3 = V3 .}\ \rho_3$$

$\sum$ P2 +P3 = G = masse totale du granulat (sable et gravier).

Apres avoir obtenu les résultats du calcul on ferra les essais d'études en préparant des gâchées d'essais et en fonctionnant des éprouvettes afin de vérifier la consistance et la résistance du béton.

Exemple pratique :

Béton binaire D=20mm

Données de base

1.Dmax

D'après les caractéristiques géométriques de l'ouvrage, les règles concernant la dimension Maximale des granulats conduisent à adopter : D=20mm

2**. La résistance caractéristique demandée** est : $\boldsymbol{\sigma'_{28} = 35MPA}$

3. L'ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône A=5 cm

4. **Dosage en ciment :** le ciment employé est de la classe 32.5, mais il a une résistance vraie moyenne à 28 jours σ'_c=48 MPA

Les granulats sont de bonne qualité : G=0.50 (tableau)

On peut donc calculer C/E par la formule :

$$\sigma'_{28} = G\sigma'_c(\frac{C}{E} - 0.5)$$

Donc 35=0.5*48(C/E-0.5) ⟶ C/E=1.95

L'abaque donne pour C/E=1.95

Et A=5cm un dosage en ciment C=375 kg/m^3

5. Dosage en eau : le dosage en eau total sur matériaux secs sera approximativement :

E=375/1.95=194 litre

6. Dosage des granulats

Les courbes granulométrique du sable et gravier sont représentés sur le même graphe

Le module de finesse de sable est satisfaisant (2.71)

Le point de brisure A de la courbe de granulaire de référence est à l'abscisse D/2=10mm (module 41), son ordonnée est $y = 50 - \sqrt{D} + K$

Pour un dosage à 375 kg/m^3 de ciment, un granulat roulé et une vibration normale, on peut adopter un terme correcteur K=-2 (tableau 6)

La correction en fonction du de finesse du sable MF=2.71 est Ks=6MF-15=+1 (tableau 6)

En définitive : Y=50-4.47-2+1=44.5%

La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe de sable au point 5% de la courbe du gravier. Le point de rencontre de ligne de partage avec la courbe de référence donne le partage des pourcentages de sable et de gravier.

%sable=36%

%gravier =64%

En adoptant pour le coefficient de compacité dans le tableau 7(D=20, béton plastique, vibration normale,) la valeur $\gamma = 0.825$

Les volumes absolus des constituants solides (ciment+sable +gravier) sont :

Volume total absolu= 1000 γ=825 litre

Volume absolu du ciment = 375/3.1=121 litre

Volume absolu des granulats (sable + gravier) = 825-121=704 litre

Volume absolu du sable= 704*0.36=253 litre

Volume absolu du gravier = 704*0.64=451 litre

Les masse volumiques absolues sont supposées les suivantes :

Sable 2.54, gravier 2.62

Les dosages en matériaux secs seront donc en KG

Sable : 253*2.54=643 kg

Gravier 451*2.62=1182 kg

Ciment 375 kg

Eau total 195 kg

Densité théorique du béton frais : = 643+1182+375+195=2395 kg/m3

Il reste à tester la formule de composition par quelque essais et d'apporté suivant les résultats les corrections nécessaire.

Correction sur l'eau

Si la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams obtenu (Aff.$_{obtenu}$) diffère de la valeur de l'affaissement au cône souhaitée (Aff.$_{souhaité}$) il est nécessaire de modifier la quantité d'eau de la composition de béton. La correction sur la quantité d'eau s'effectue grâce à l'abaque de la figure 4.

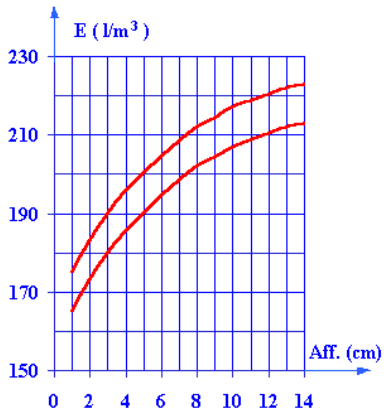


Figure 4: *Variation de la quantité d'eau en fonction de l'affaissement au cône pour un béton courant.*

Pour déterminer la valeur de E corrigée (Fig.5) : Positionner sur le graphe le point caractéristique de la composition effectuée ($E_{utilisée}$ et affaissement au cône obtenu $Aff._{obtenu}$). Faire passer par ce point une courbe homothétique à celles du diagramme. Pour la valeur de l'affaissement souhaité ($Aff._{souhaité}$) en déduire la quantité d'eau à utiliser ($E_{corrigée}$).

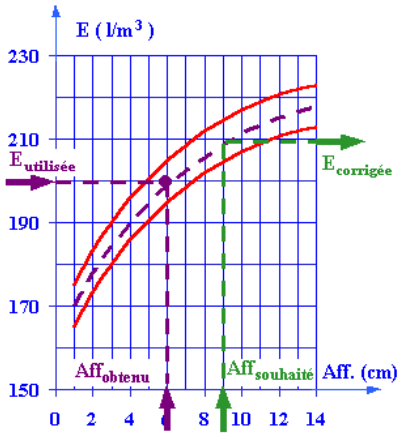


Figure 5 : Exemple de détermination de E corrigée.

Exemple : Pour une valeur initiale de E de 200 litres ayant conduit à un affaissement au cône de 6 cm, la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'un affaissement au cône de 9 cm est d'environ 210 litres.

Correction sur la quantité de ciment

Lorsque la résistance obtenue à 28 jours ($\sigma'_{28\ réelle}$) diffère de la résistance souhaitée (σ'_{28}) il convient d'apporter une correction sur le dosage de ciment ($C_{corrigé}$). Si $C_{réel}$ et $E_{réelle}$ sont les dosages initiaux en ciment et en eau effectivement utilisés pour la confection du béton, il est possible d'écrire en fonction des résultats obtenus ou des résultats souhaités deux équations résultant de la formulation de Bolomey :

Résultats obtenus : $\sigma'_{28\ réelle} = G\,\sigma'_{c}\,(C_{réel}/E_{réelle} - 0.5)$

Résultats souhaités : $\sigma'_{28} = G\,\sigma'_{c}\,(C_{corrigé}/E_{réelle} - 0.5)$

En combinant les équations précédentes on obtient :

$\sigma'_{28} / \sigma'_{28\ réelle} = (C_{corrigé}/E_{réelle} - 0.5) / (C_{réel}/E_{réelle} - 0.5)$

D'où la détermination de $C_{corrigé.}$