

# **Formulation des bétons**

# Introduction

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le **mélange optimal** des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause. Les méthodes de composition se subdivisent en deux types :

❖ Les méthodes à « granularité continue »

Exemple : béton constitué d'un sable **0/5 mm** et deux graviers **5/20 mm** et **20/50 mm**.

❖ méthodes à « granularité discontinue »

Exemple : béton constitué d'un sable **0/5 mm** et d'un gravier **20/50**.

# *Les méthodes de formulation du Béton*

Le béton est un **mélange** dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps **bien définies**, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux :

- **les données du projet** : caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferrailage, etc.
- **les données du chantier** : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques, etc.
- **les données liées aux propriétés du béton** : maniabilité, compacité, durabilité, aspect, etc.

On mesure donc l'importance de l'étude de la formulation du béton, d'autant plus nécessaire que les caractéristiques requises sont élevées.

# *Les méthodes de formulation du Béton*

## 1.Méthode de Bolomey :

La méthode de Bolomey a le mérite **d'avoir ouvert la voie** aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre **2,5 et 2,7 kg/m<sup>3</sup>** ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

## 2.Méthode de Faury :

Cette méthode est venue en **1941** compléter la méthode de **Bolomey**. La méthode de Faury donne des bétons comportant **moins de sable** et **plus de gravier**. Ces bétons sont plus raides et conviendront à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons Faury auront souvent **une résistance mécanique supérieure** aux bétons Bolomey correspondants.

# ***Les méthodes de formulation du Béton***

## **3.Méthode de D'ABRAMS :**

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain **module de finesse global** pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de manière que **les vides** dans ce mélange soient en principe, **réduits au minimum**.

## **4.Méthode de Valette :**

R. Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « **dosage des bétons à compacité maximale** » ou « **dosage des bétons à minimum de sable** » ou « **dosage des bétons à granularité discontinue** ».

# ***Les méthodes de formulation du Béton***

## **5.Méthode de Joisel :**

S'inspirant comme Faury de la théorie de Caquot mais en la généralisant, A. Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à **la compacité maximale** de dimension uniforme selon les moyens de serrage;  $m$  peut alors varier de 3 à 10.

Afin d'obtenir une courbe granulométrique de référence qui se réduit à une simple droite, l'échelle des abscisses n'est plus systématiquement proportionnelle à  $5d$  (Faury) mais à  $md$ ,  $m$  variant avec le serrage des matériaux,

# Méthode de Dreux- Gorisse

## **6.Méthode de Dreux-Gorisse :**

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer **les quantités optimales** de matériaux (**eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G**) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- 1) Détermination du rapport C/E**
- 2) Détermination de C et E**
- 3) Détermination du mélange optimal à minimum de vides**
- 4) Détermination de la compacité du béton**
- 5) Détermination des masses de granulats**

# Détermination du rapport C/E

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

*Avec :*

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

$\sigma'_c$  : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars,

$C$  : Dosage en ciment ( en kg/m<sup>3</sup>),

$E$  : Dosage en eau totale sur matériau secs ( en litre),

$G$  : Coefficient granulaire

<b>Dénomination normalisée</b>	<b>32,5 MPa</b>	<b>42.5MPa</b>	<b>52,5 MPa</b>
<b>Classe vraie</b> <b><math>\sigma'_C</math></b>	<b>45 MPa</b>	<b>55 MPa</b>	<b>&gt; 60 MPa</b>

*Tableau n° 02 :*

*Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.*

## ***Valeurs approximatives du coefficient granulaire ( G )***

Qualité des granulats	Dimension $D_{max}$ des granulats		
	Fins $D_{max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{max} < 31,5$	Gros $D_{max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

*Nota : Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe)*

*Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée*

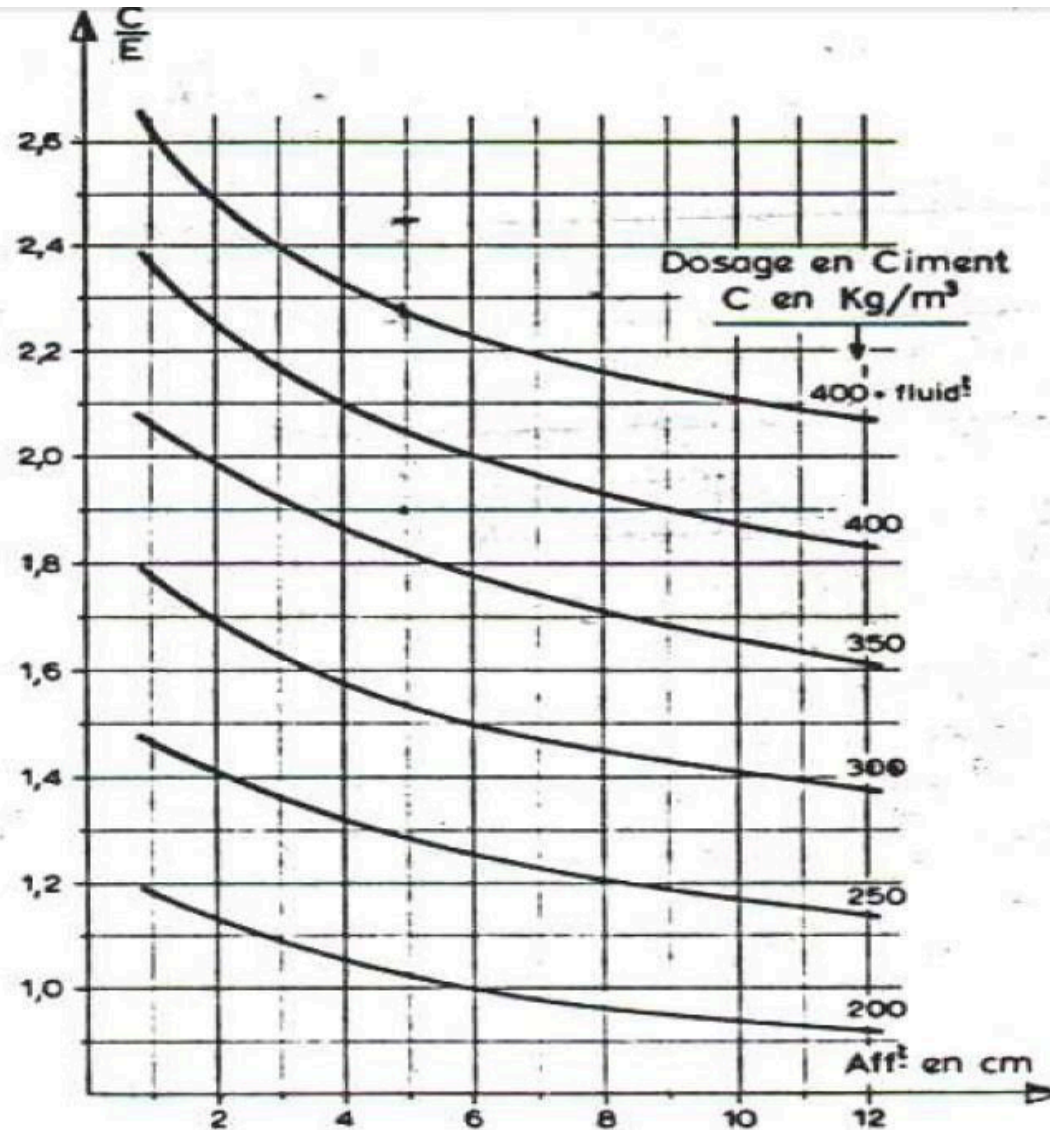
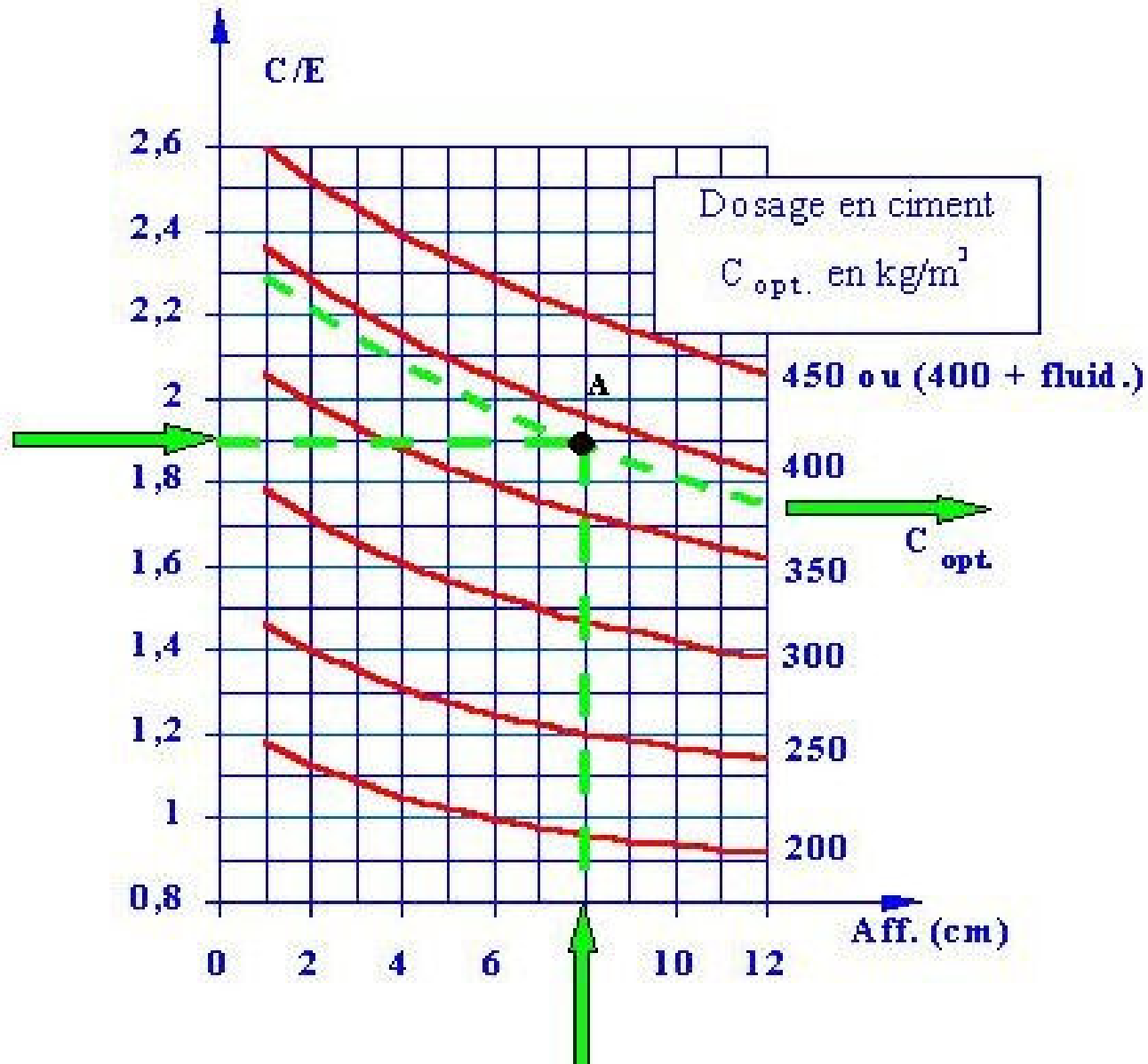


Figure (b) : Exemple de détermination de  $C_{opt}$ .



# Dosage en eau

La quantité d'eau  $E$  nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de  $C/E$  et de  $C$ .

## ***Correction du dosage en eau en fonction de $D_{max}$***

Dimension maximale des granulats ( $D_{max}$ en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

*Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats.*

***$D = 20 \text{ mm}$***  ( dimension la plus courante)

## ***Analyses granulométriques des granulats***

Sur un graphique d'analyse granulométrique, **trace la courbe granulaire de référence OAB.**

- Point **B à l'ordonnée 100% à la dimension D** du plus gros granulats.
- Point de brisure A à pour coordonnées :

En abscisse Si  $D \leq 25 \text{ mm}$   $X = D/2$ .

Si  $D > 25 \text{ mm}$   $\text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{\text{max}}) + 38) / 2$

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

**K est un coefficient donné par le tableau, Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :**

**Ks :** (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable)

**Ks = (6 M<sub>fs</sub> - 15)** avec M<sub>fs</sub> le module de finesse du sable.

**Kp :** (correction supplémentaire si le béton est pompable)

**Kp = +5 à +10** selon le degré de plasticité désiré.

## 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	+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



## **Coefficient de compacité ( $\gamma$ ) :**

*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  $\gamma$  dans le tableau*

Consistance	Serrage	compacité ( $c_0$ )						
		$D_{max} = 5$	$D_{max} = 8$	$D_{max} = 12,5$	$D_{max} = 20$	$D_{max} = 31,5$	$D_{max} = 50$	$D_{max} = 80$
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	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 (F)	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	0,785	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 ( $c_1 = - 0,01$ )*

*Sable et gravier concassé ( $c_1 = - 0,03$ )*

\* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de  $c$  : ( $c_2 = -0.03$ )

\* Pour un dosage en ciment  $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$  on apportera le terme correctif suivant :  
( $c_3 = (C - 350) / 5000$ )

**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**

## ***Dosage des granulats :***

*On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats  $g_1, g_2, g_3$ , par exemple.*

*Si  $C$  est le dosage en ciment, le volume absolue des grains de ciment est :*

$$***V_c = C/3.1***$$

$$***V_T = V_g + V_c = 1000\gamma***$$

$$***V_g = 1000 \gamma - V_c***$$

*Si  $g_1$  ,  $g_2$ ,  $g_3$  sont les pourcentages en volume absolu des granulats . Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :*

- $V_s = V_g * S \%$
- $V_g = V_g * g \%$
- $V_G = V_g * G \%$

$$S = V_g * S \% * \rho_s (S)$$
$$g = V_g * g \% * \rho_s (g)$$
$$G = V_g * G \% * \rho_s (G)$$

# Exercice: Données indispensables

- **Données sur le béton:**

- Résistance à 28 jours  $f_{c28}$  en MPa= 35MPa
- Affaissement en cm : A= 8 cm
- Serrage : vibration courante
- Pompage ou non du béton : non pompé

- **Données sur le ciment:**

- Classe vraie à 28 jours :  $\sigma_{c28}=42,5$  MPa
- Masse volumique réelle en g/cm<sup>3</sup>: 3.1

- **Données sur les granulats:**

- Qualité des granulat: courante
- Forme des granulats: concassée
- Propreté (ES): ES=75
- Tableaux d'analyse granulométrique des granulats: donnés
- Module de finesse :  $M_f=1.92$  (sable)
- Dimension maximale des granulats :  $D_{max}=20$  mm (gravier)
- Teneur en en W(%) des granulats: W(%) sable = 4 % W(%) gravier = 2%
- Masses volumiques réelles des granulats:  $M_{Vr}(\text{sable})=2,6$  g/cm<sup>3</sup>  $M_{Vr}(\text{gravier})=2,7$  g/cm<sup>3</sup>

# LES DIFFERENTES ETAPES

- 1/ DETERMINATION DU DOSAGE EN CIMENT
- 2/ DETERMINATION DU DOSAGE EN EAU
- 3/ CONTRÔLE DES QUALITES DE GRANULAT (SABLE)
- 4/ TRACE DE LA COURBE GRANULAIRE OAB
- 5/ TRACE DE LA LIGNE DE PARTAGE
- 6/ DETERMINATION DU DOSAGE DES GRANULATS
- 7/ DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS

# ETAPE 1 : DETERMINATION DU DOSAGE EN CIMENT

Données nécessaires:  $f_{c28}$  (béton) ;  $\sigma_{c28}$ (classe vraie du ciment) ;  $D_{max}$  ; Affaissement ; qualité des granulats

- 1-1 Résistance moyenne à 28 jours: Calcul de  $f_{cm} = f_{c28} * 1.15 = 40.25 = 40 \text{ MPa}$
- 1.2 Rapport C/E:
  - Tableau 1: détermination de G

TABLEAU N°1

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins $D \leq 12.5 \text{ mm}$	Moyens $20 \leq D \leq 31.5 \text{ mm}$	Gros $D \geq 50 \text{ mm}$
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, Courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

$D_{max} = 20 \text{ mm}$

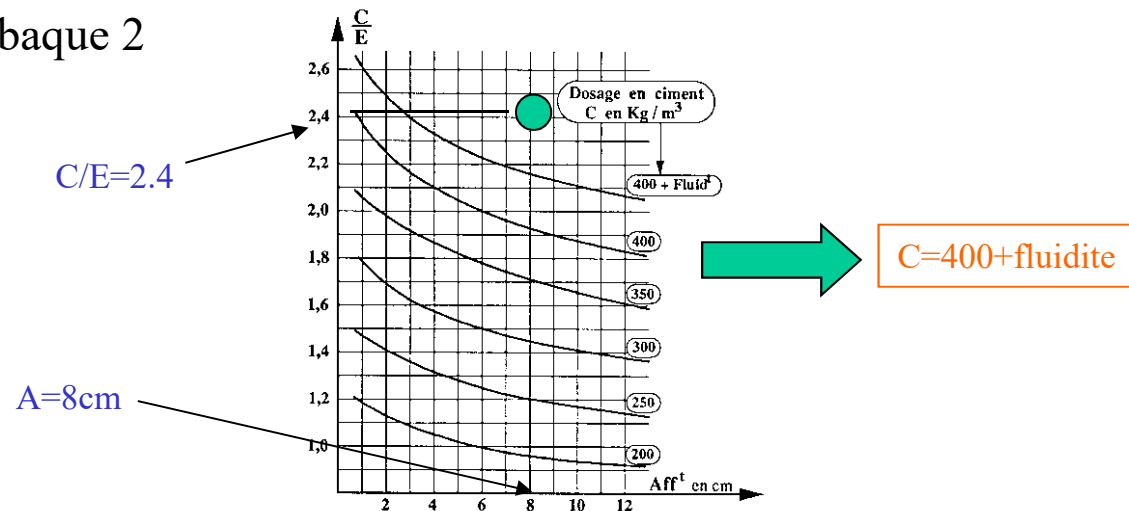
Coefficient granulaire G

G=0.5

➤ Formule de BOLOMEY donne:

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \cdot \sigma_{c28}} + G \quad \rightarrow \quad \frac{C}{E} = \frac{40}{0.5 * 42,5} + 0.5 = 2.4$$

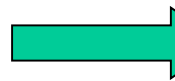
• 1-3 Dosage en ciment: Abaque 2



# ETAPE 2 : DOSAGE EN EAU

Données nécessaires:  $D_{max}; C/E$

- 2-1 Calcul de E:


$$\frac{C}{E} = 2.4 \Rightarrow E = \frac{400}{2.4} \Rightarrow E = 166.66l / m^3$$

- 2-2 Correction sur E: abaque 3

TABLEAU N°3

Dimension maximale des Granulats D en mm	4	8	12.5	20	31.5	50	80
Correction sur le dosage En eau	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

$D_{max}=20$  mm

Correction sur le dosage en eau en fonction de D Correction : 0 %


$$E_c = E = 166.66l / m^3$$

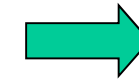
# ETAPE 3 : CONTROLE QUALITE DES GRANULATS

Données nécessaires: ES; Mf (sable)

## • 3-1 Propreté des granulats : tableau 4

ES à vue	ES piston	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	sable argileux: risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq ES < 75$	$60 \leq ES < 70$	sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 \leq ES < 85$	$70 \leq ES < 80$	sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeur optimale ES piston = 75; ES à vue = 80)
ES $\geq$ 85	ES $\geq$ 80	sable très propre: l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

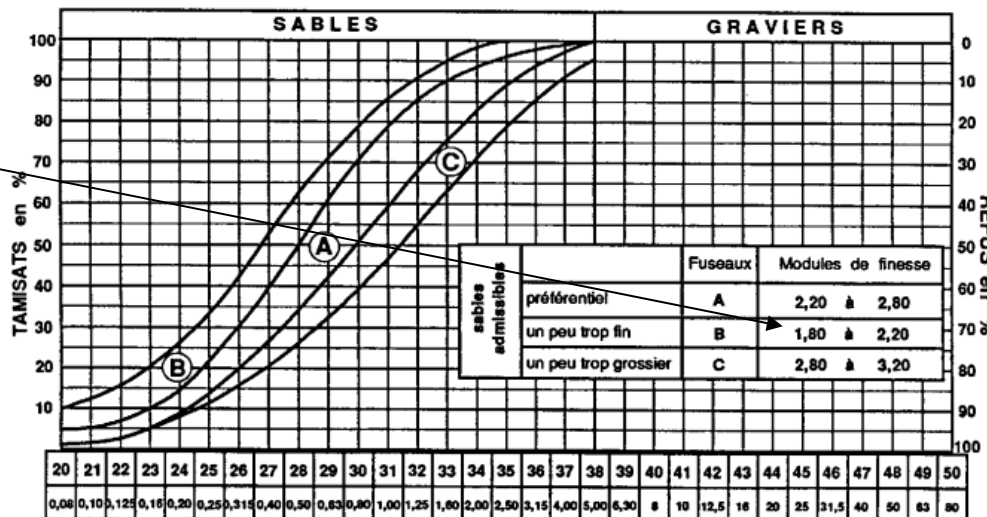
ES=75



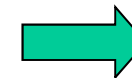
Sable propre

Interprétation d'un essai d'équivalent de sable

## • 3-2 Module de finesse Mf : tableau 5



Mf=1.92



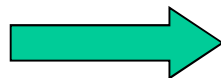
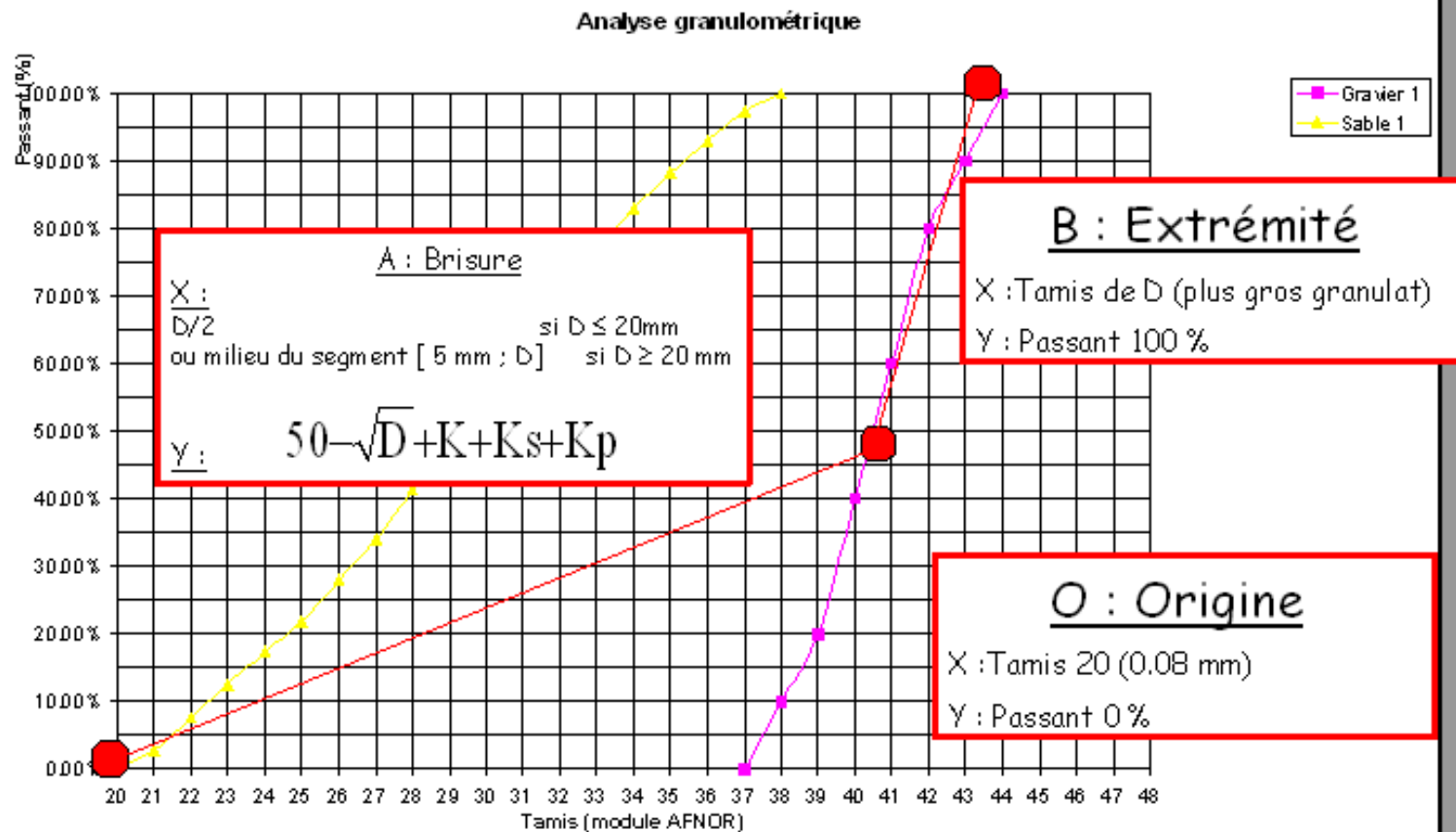
Sable un peu trop fin

Fuseaux des sables admissibles

# ETAPE 4 : TRACE COURBE GRANULAIRE OAB

Données nécessaires: Dmax ; Vibration ; forme granulat ; dosage en ciment ; Mf ; pompage ou non

Dmax=20 mm ou  
module AFNOR: 44



A (10 mm ou module AFNOR 41; 47.7)

# Calcul de $YA = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

**TABLEAU N°6**

Vibration Forme des granulats (sable en particulier)	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
<b>Dosage en Ciment</b>						
400 + Fluidt	-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

→  $K = -2$

**Note 1 :** Correction supplémentaire  $K_s$  : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire sur K peut être effectuée en ajoutant la valeur  $K_s = 6 Mf - 15$  ( $Mf$  étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5).

→  $K_s = 6Mf - 15 = 6 * 1,92 - 15 = -3.48$

**Note 2 :** Correction supplémentaire  $K_p$  : Si la qualité 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  $K_p = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.

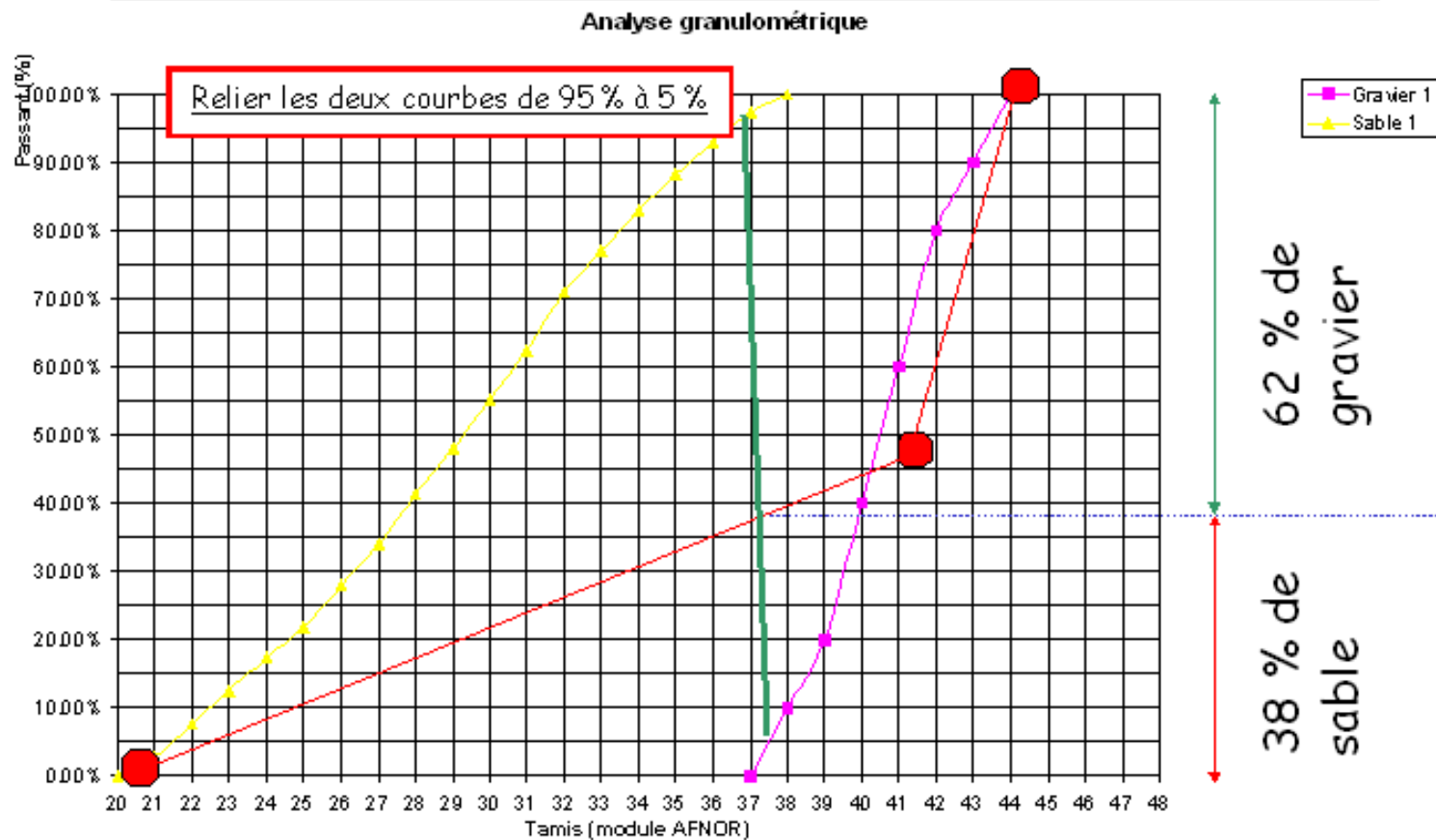
→  $K_p = 0$

Valeur du terme correcteur K

→  $YA = 50 - \sqrt{20} - 2 - 3.48 = 40.05$

# ETAPE 5 : TRACE DE LA LIGNE DE PARTAGE

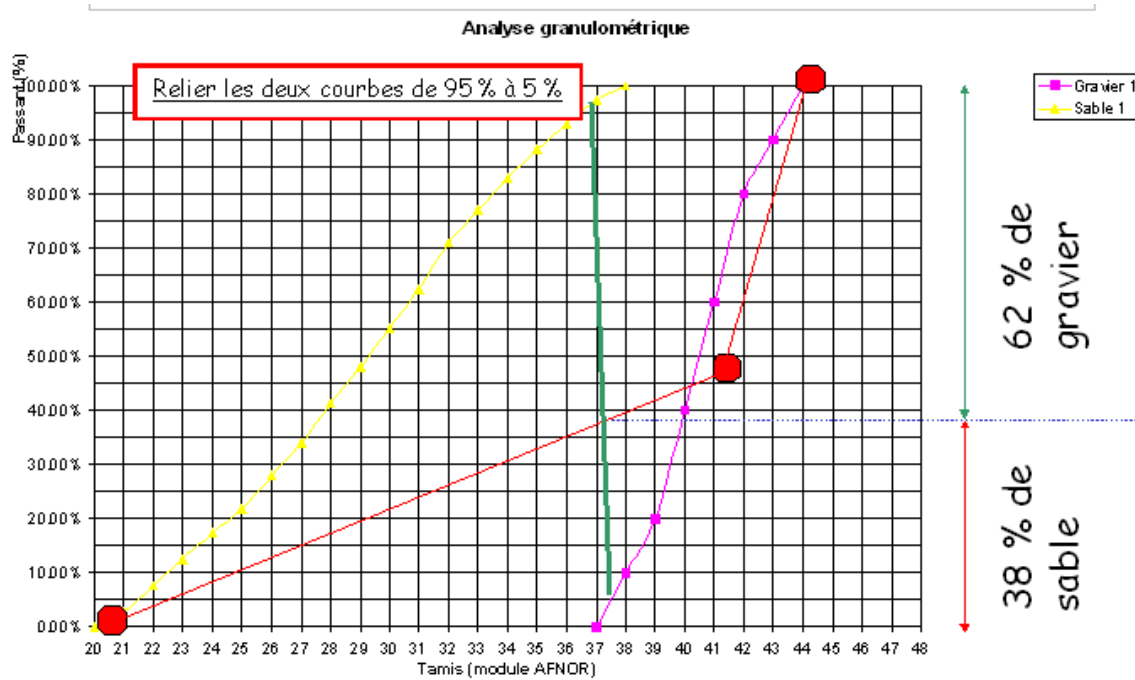
Données nécessaires: courbes granulométriques ; courbe granulaire OAB



# ETAPE 6 : DETERMINATION DU DOSAGE DES GRANULATS

Données nécessaires: Consistance béton ; serrage ; Dmax ; forme granulat

• 6-1 Pourcentage de sable et de gravier:      %S=38%; %G=62 %



## •6-2 Coefficient de compacité $\gamma$ :

TABLEAU N°8

Plasticité	Serrage	Affaissement A (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 très mou	Piquage léger	13 à 15
Béton liquide (fluide)		$\geq 16$



A=8 cm: béton plastique

Évaluation de l'ouvrabilité par rapport à l'affaissement au cône.

TABLEAU N°9

Consistance	Serrage	$\gamma$ coefficient de compacité						
		D = 4	D = 8	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage.....	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible.....	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	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
Ferme	Vibration puissante.....	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	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.....	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855



$\gamma = 0.825$

NOTA ( simplifié ) :

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 concassés = - 0.03


Pour des granulats légers on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de  $\gamma$  qui correspondent dans ce tableau à des granulats denses ordinaires.




$\gamma_{\text{corrigé}} = 0.825 - 0.03 = 0.795$


Valeur du coefficient de compacité

•6-3 Volume absolu des constituants:

•Volume absolu du ciment: *Ciment:*  $c = \frac{C}{3.1}$    $c = \frac{400}{3.1} = 129.03 \text{ l/m}^3$



•Volume absolu des granulats: *Sable+Gravier:*  $V = 1000 \gamma - c$

  $V = 1000 * 0.795 - 129.03 = 665.97 \text{ l/m}^3$

•Volume absolu du sable:  $v1 = V \% \text{ sable}$    $v1 = 665.97 * \frac{39}{100} = 259.73 \text{ l/m}^3$

•Volume absolu du gravier:  $v2 = V \% \text{ gravier}$    $v2 = 665.97 * \frac{61}{100} = 412.9 \text{ l/m}^3$

•6-4 Dosage pondéral des granulats (pour 1 m<sup>3</sup> de béton):

SABLE	$S = v1 \cdot \gamma_S$		$S = 259.73 * 2.6 = 675.3 \text{ kg/m}^3$
GRAVIER	$G = v2 \cdot \gamma_G$		$G = 412.9 * 2.7 = 1114.83 \text{ kg/m}^3$

# ETAPE 7 : DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS

Données nécessaires: teneur en eau des granulats ; résultats des étapes précédentes.

## •7-1 Rappel du dosage des différents constituants pour 1 m<sup>3</sup> de béton:

MATERIAUX	VOLUMES (litres)	MASSES (kg)	W(%)	MASSES HUMIDES (kg)	Quantité d'eau (kg ou litres)
Ciment		400			
Gravier	412,9	1114.83	2	1137,13	22.30
Sable	259,73	675.3	4	702.31	27.01
Eau	166,66	166.66			Quantité d'eau à rajouter : 117.35

$$MH = 1114,83 * 1,02 = 1137,13 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$Q.E. = 1137.13 - 1114.83 = 22.30$$

$$MH = 675.3 * 1.04 = 702.31 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$Q.E. = 702.31 - 675.3 = 27.01$$

$$Q.E. = 166.66 - 22.30 - 27.01 = 117.35$$

## •7-2 Densité théorique du béton frais:

$$\Delta_o = \frac{C + E + S + G}{1000} \rightarrow \Delta_o = \frac{400 + 1137.13 + 702.31 + 117.35}{1000} = 2.36$$

(E ou E<sub>c</sub>)