

# Travaux pratiques Technologie du béton

S1 (2020/2021)

## Partie 1 (compositions du béton)

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 la partie d'ouvrage en cause.

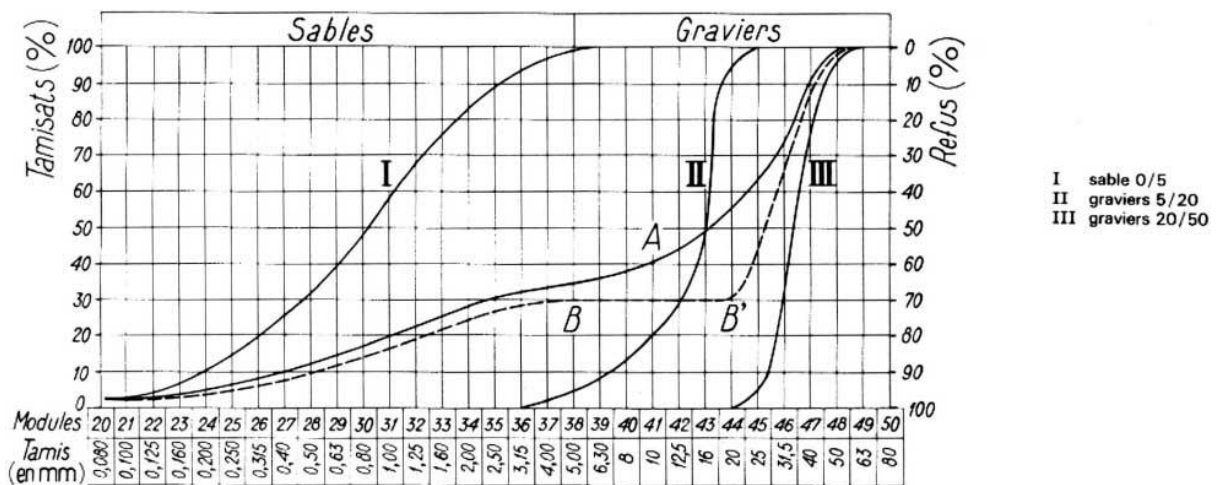
Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes ; elles aboutissent à des dosages **volumétriques** ou, de préférence, **pondéraux**, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

Ces méthodes sont dites à **granularité continue** lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue ; autrement dit, du plus petit grain de ciment de dimension de  $\approx 6,3 \mu\text{m}$  au plus gros grain D des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées ; exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et de deux graviers 5/20 mm et 20/50 mm.

On dit par contre que l'on a une **granularité discontinue** lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires (exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et d'un gravier 20/50 mm le palier atteste du manque d'éléments entre 5 et 20 mm). Ces deux types de béton, **continu** et **discontinu**, ont eu chacun leurs chauds partisans ou détracteurs. À notre avis, il n'y a pas entre ces deux types de granularité, de profondes différences justifiant la querelle encore persistante à leur égard ; d'ailleurs, dans la plupart des cas, la continuité ou la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités ; nous pensons que la granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité ; par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant, en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité. Il semble toutefois que **la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue**.

Quelle que soit la méthode utilisée, la formule de composition **calculée** ne peut prétendre correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision, par le calcul, certaines qualités des constituants qui influent directement sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité,

adhésivité des granulats, fines du sable, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc. C'est pourquoi, comme beaucoup de spécialistes en la matière, **nous pensons que le calcul d'un mélange n'est qu'une première approche de préparation de mélanges d'essais** qui permettront de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré, et dont les critères clairement définis constituent l'énoncé du problème posé. Les méthodes existantes cherchent l'optimisation de la composition, elles sont évidemment la base. Parmi les méthodes connues on cite à titre d'exemple : règle du module de finesse d'Abrams, méthodes de Bolomey, de Faury, de Vallette, de Joisel, de Lezy, de Baron et Lesage, méthode des volumes absolus du **factor specific gravity**, etc.



Analyse granulométrique (d'après norme NF P 18-304)

## 1. Critères en fonction de la destination des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte ; il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

À notre avis, quatre critères principaux doivent être retenus :

- la dimension maximale des granulats ;
- la résistance ;
- l'ouvrabilité ;
- l'agressivité du milieu ambiant.

### 1.1 Dimension maximale *D* des granulats

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc.), mais elle

dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage).

Pour définir approximativement une valeur admissible de  $D$  nous préconisons l'application des règles résumées dans le tableau 1.

Dimension admissible $D$ pour les plus gros granulats	
Caractéristiques de la pièce à bétonner	Valeur maximale de $D$
$e$ : espacement entre armatures principales	$e$
$r$ : rayon moyen des mailles de ferrailage	$0.8 r$
$R$ : rayon moyen du moule	$R$
$h_m$ : épaisseur minimale de la pièce	$h_m / 5$

Tableau 1

Le rayon moyen  $r$  d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre.

Le rayon moyen  $R$  du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la *surface de coffrage et d'armatures* en contact avec le béton.

De plus, par rapport à la couverture  $c$ , épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage, on pourra adopter la règle résumée dans le tableau 2.

Enrobage minimale $c$ des armatures		
Milieu ambiant	$c$ minimal	$D$ maximal
Locaux couverts et clos	1 cm	$2 c$
Exposition aux intempéries	2 cm	$1.5 c$
Milieu agressif	3 cm	$c$
Milieu très agressif	4 cm	$c - 5\text{mm}$

Tableau 2

## 1.2 Résistance souhaitée

D'après les résultats de la note de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé.

Cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur éprouvettes de contrôle (soumises à la rupture) en déduisant de la moyenne  $k$  fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

D'après les règlements en vigueur, on prend pour  $k$  la valeur 0,85 à 1,2 en général et selon les cas ; il convient donc de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20 % supérieure à la résistance caractéristique exigée. Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport  $G/S$  (proportion gravier/sable).

### 1.3 Ouvrabilité

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en œuvre pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage du coffrage et sans ségrégation.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le tableau 3.

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition du béton.

### 1.4 Agressivité du milieu ambiant

Le milieu ambiant dans lequel se trouvera l'ouvrage conditionnera également, selon son agressivité, l'étude de la composition du béton.

La **présence d'eaux agressives** (eaux de mer, gypseuses, acides, très pures, etc.) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrages soumis à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'un adjuvant.

Consistance du béton		
Consistance du béton	Affaissement au cône cm	Serrage nécessaire
Très ferme	$\leq 2$	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	$\geq 16$	Léger piquage

Tableau 3

## **2. Méthodes expérimentales de composition**

### **2.1 Méthode de Baron et Lesage**

Elle a pour objet d'obtenir sur chantier le béton comportant le minimum de vides et d'eau. L'étude peut être faite soit à partir de mesures de compacité (par exemple, par la méthode Vallette), soit à partir de mesures de temps d'écoulement, base de la présente méthode.

Celle-ci est fondée sur l'existence d'une fonction qui caractérise le mélange des constituants solides et sur le repérage pratique de cette fonction. Une propriété de cette dernière est d'avoir la valeur maximale pour le meilleur béton, quelles que soient les conditions de mise en œuvre et la teneur en eau.

La méthode consiste ainsi à déterminer les proportions des constituants pour que ladite fonction soit maximale.

Le meilleur béton possède trois qualités :

- minimum de vides ;
- minimum d'eau ;
- minimum de ségrégabilité (ou meilleure homogénéité).

On ne peut rechercher simultanément ces trois qualités. Il est nécessaire d'en choisir une, *a priori*, pour commencer l'étude.

### **2.2 Méthode de dreux-gorisse**

#### **2.2.1 Objectif**

Déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier des charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m<sup>3</sup>).

#### **2.2.2 Définition du cahier des charges**

Il s'agit de définir, en fonction du type d'ouvrage à réaliser, les paramètres nécessaires à la mise en œuvre du béton et à la stabilité à court et long terme de l'ouvrage.

Les paramètres principaux devant être définis sont : la maniabilité et la résistance du béton, la nature du ciment et le type de granulats.

#### ***Critère de maniabilité :***

La maniabilité est caractérisée, entre autre, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams. Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier (Tab.1).

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

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

**Critère de résistance :**

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique  $\sigma'_{28}$ .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression  $f_{c28}$  nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28} = 1.15 \times f_{c28}$$

**Choix du ciment :**

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie  $\sigma'_c$  et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc...).

La classe vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé. Le cimentier garantit une valeur minimale atteinte par au moins 95 % des échantillons (dénomination normalisée spécifiée sur le sac de ciment). La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le fabricant est donnée dans le tableau 2.

**Tableau 2 : Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.**

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie $\sigma'_c$	35 à 45 MPa	45 à 55 MPa	> 55 MPa

### 2.3 Formulation 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 :

Détermination du rapport C/E

Détermination de C et E

Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Détermination de la compacité du béton

Détermination des masses de granulats

Les résultats intermédiaires relatifs à chaque étape de calcul seront consignés sur la fiche de résultats jointe en annexe.

#### *Détermination du rapport C/E*

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

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

Avec :

$\sigma'_{28}$  = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

$\sigma'_c$  = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m<sup>3</sup> de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m<sup>3</sup> de béton

G' = Coefficient granulaire (Tab.4) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

*Tableau 4 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D<sub>max</sub>.*

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

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

### Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 1 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

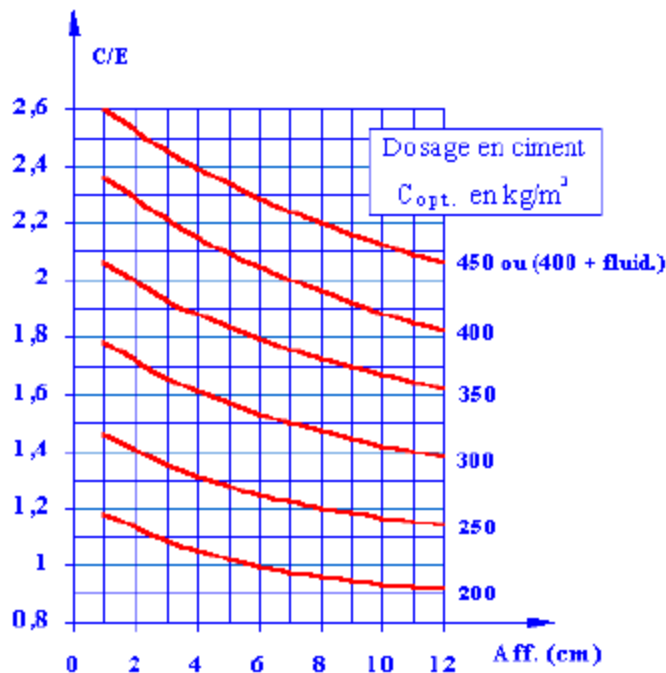


Figure 1 : Abaque permettant la détermination de  $C_{opt}$ .

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de  $C_{opt}$ . Au-delà de 400 kg de ciment par m<sup>3</sup> de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant (Fluid.).

**Exemple :** Pour des valeurs de C/E de 1,9 et un affaissement au cône de 8 cm, la quantité optimale de ciment nécessaire à la confection d'un mètre cube de béton est de ..... kg.

### Détermination de E

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

### Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E

Lorsque la dimension maximale des granulats  $D_{max}$  est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. Les corrections (Tab.5) sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé).



**Tableau 5 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de  $D_{max}$ .**

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

***Détermination du mélange optimal à minimum de vides***

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides.

Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

Tracé de la droite brisée de référence

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

***Tracé de la droite de référence de Dreux :***

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse :

Si  $D_{max} \leq 20 \text{ mm}$      $X = D_{max} / 2$

Si  $D_{max} > 20 \text{ mm}$      $\text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{max})+38) / 2$

En ordonnée :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \quad \text{où } K' = K + K_s + K_p$$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés

K est un coefficient donné par le tableau 6,  $K_s$  et  $K_p$  étant des coefficients correctifs définis par :

$K_s$  (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

$K_s = (6 M_{f_s} - 15)$  avec  $M_{f_s}$  le module de finesse du sable.

$K_p$  (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

$K_p = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.

**Tableau 6 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.**

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 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

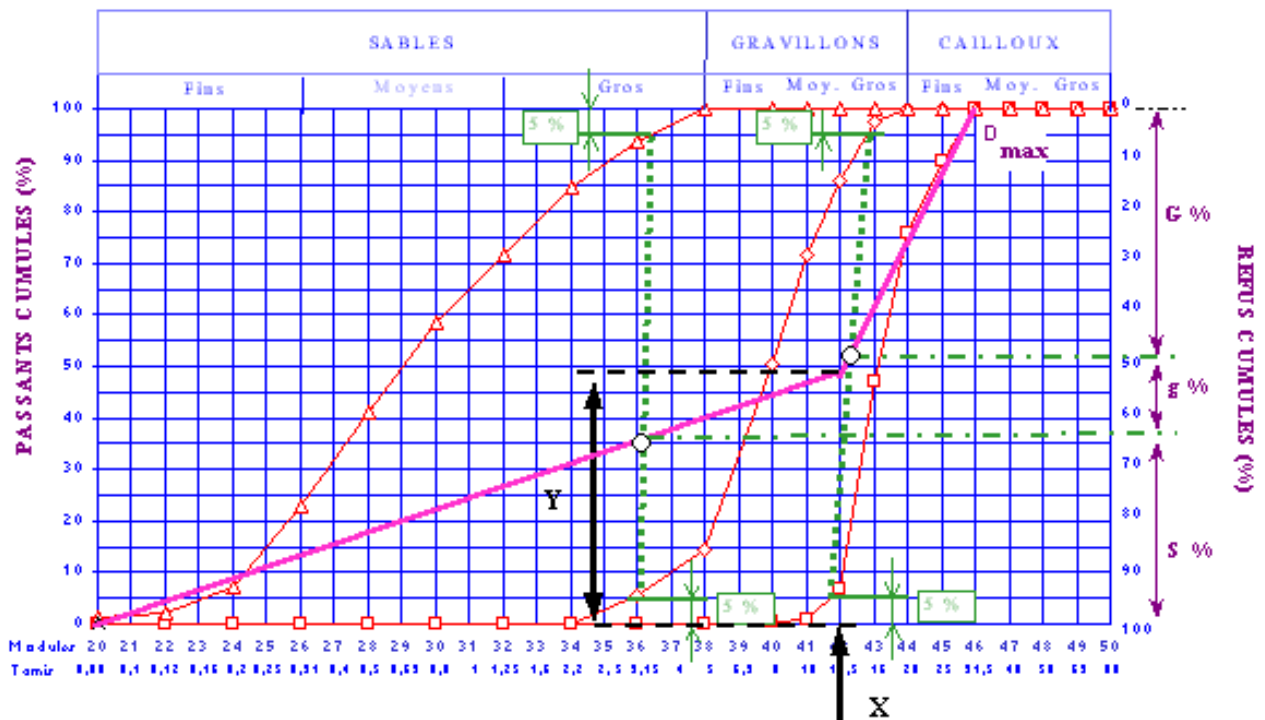
La droite de Dreux a pour origine le point 0 origine du graphe et pour extrémité le point  $D_{max}$  caractéristique des plus gros granulats.

***Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :***

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure 3 des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE



**Figure 3 : Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.**

### ***Détermination de la compacité du béton***

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m<sup>3</sup> de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base  $c_0$  est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tab. 7). Des corrections ( $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$ ) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tab.7) :  $c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$ .

La valeur de la compacité  $c$  du béton permet de déterminer le volume total absolu  $V$  de granulats intervenant dans la formulation du béton :  $V = (c - V_c)$  où  $V_c$  est le volume de ciment défini par  $V_c = C / \rho_{s(c)}$  où  $\rho_{s(c)}$  est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

**Tableau 7 : Compacité du béton en fonction de  $D_{max}$ , de la consistance et du serrage.**

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 :  
 ( $c_3 = (C - 350) / 5000$ )

### Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable ( $V_s$ ) de gravillon ( $V_g$ ) et de gravier ( $V_G$ ) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$\begin{aligned}
 V_S &= V * S \% & S &= V * S \% * \rho_{s(S)} \\
 V_g &= V * g \% & g &= V * g \% * \rho_{s(g)} \\
 V_G &= V * G \% & G &= V * G \% * \rho_{s(G)}
 \end{aligned}$$

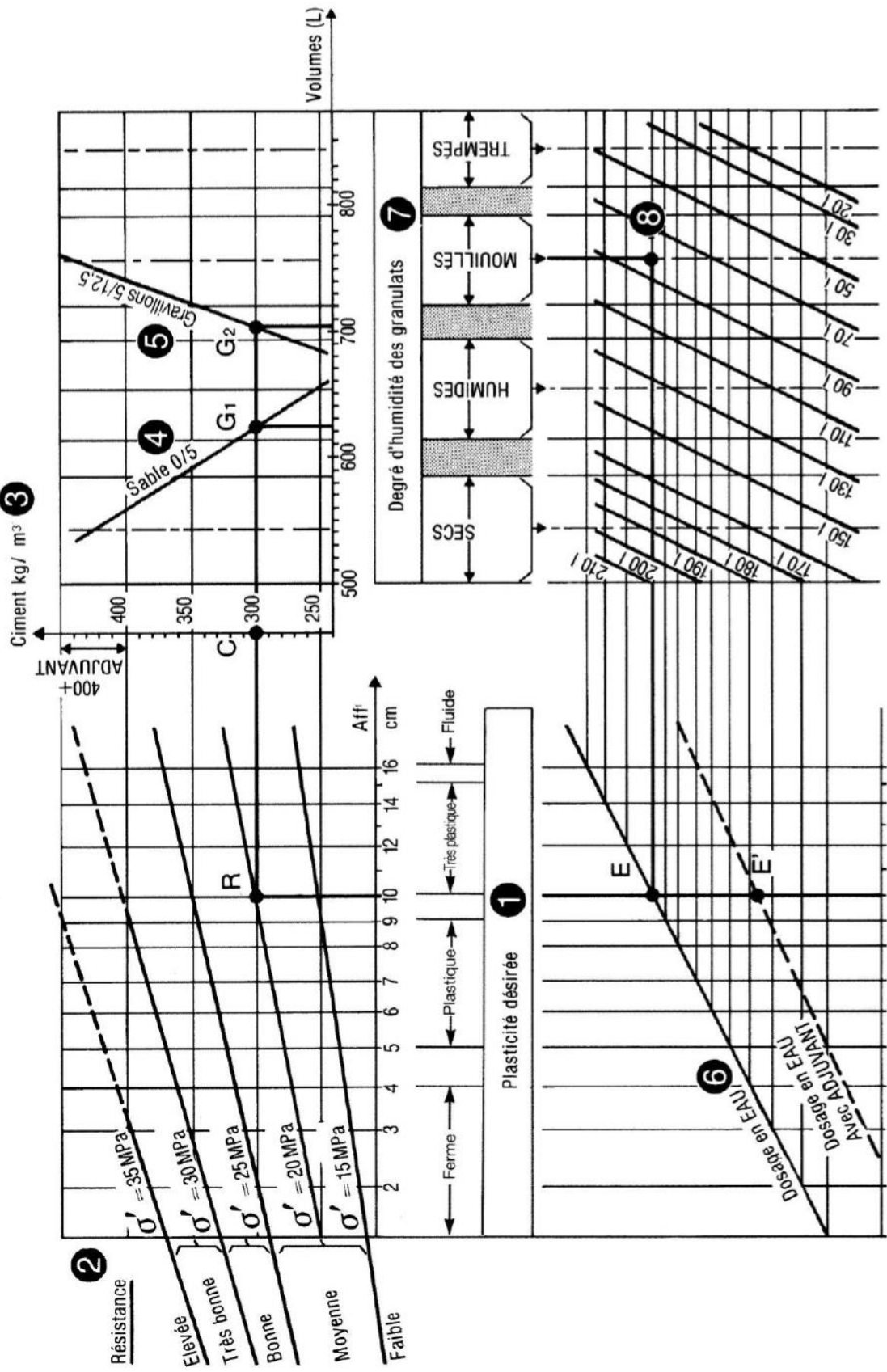
A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes :  $\rho_s(c) = 3,1 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho_s(S) = 2,6 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho_s(g) = 2,6 \text{ t/m}^3$  et  $\rho_s(G) = 2,6 \text{ t/m}^3$ .

### Obtention de la formulation théorique de béton

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G. La masse totale d'un mètre cube de béton  $\Delta_0 = (E + C + S + g + G)$  est pour un béton courant comprise entre 2,3 t/m<sup>3</sup> et 2,5 t/m<sup>3</sup>. La formulation obtenue reste théorique et il convient de la tester et de la corriger par des essais de laboratoire avant d'être utilisée.



# Abaque n° 1 – Béton fin – D = 12,5 mm



# Abaque n° 2 – Béton normal – D = 20 mm

