

---

**BETON****I.1 GENERALITES**

*Un béton hydraulique* est un mélange de mortier avec une certaine proportion de gravillons ou de pierres destinés à compléter l'ossature minérale dans des conditions à la fois compatibles avec les nécessités de la mise en œuvre et commandées par des considérations de compacité de résistance et d'économie.

On fabrique généralement le béton en un seul stade, par mélange dosée du ciment, du sable et des gravillons (ou des pierres) et gâchage à l'eau en quantité déterminée pour le mouillage, l'ouvrabilité (ou maniabilité), et la prise, compte tenu de l'humidité des granulats (particulièrement des sables).

Les mortiers et bétons font prise et durcissent. C'est la prise du liant (chaux ou ciment) qui est la cause de l'évolution des compounds d'agrégats inertes et de pâte active. Il est nécessaire pour avoir un produit irréprochable que tous ces grains inertes, des plus petits aux plus gros, soient non seulement enveloppés de pâte de ciment, mais qu'ils adhèrent à cette dernière.

Plusieurs conditions sont indispensables à l'adhérence liant-granulats:

- Il faut que les grains des granulats soient hydrophiles
- Il faut que les grains soient mouillés par l'eau soit directement, soit par la pâte de ciment et d'eau.
- La relation d'adhérence entre le liant et les grains inertes doit être une relation d'affinité.
- L'adhérence du liant aux grains inertes rend indispensable la propreté de ces derniers.
- L'enrobage parfait des grains par des films d'une pâte de ciment, comporte des difficultés très rapidement croissantes avec la grosseur des grains inertes et nécessite la constitution de bétons à minimum de grains fins (< 200 pour les grains autres que les grains de ciment.

La quantité d'eau est dosée en fonction des moyens de serrage dont on peut disposer (indépendamment des autres conditions telles que : moyen de transport, granulométrie des granulats, dosage en ciment, etc.), pour assurer une bonne ouvrabilité du béton. Donc, le rapport eau/ciment est essentiel.

**I.2 DIFFERENTS CATEGORIES DE BETONS**

La Norme P 18-301 classe les bétons de construction en trois types, suivant leur emploi :

- **Type A** : résistances mécaniques très élevées (ouvrages BA)
- **Type B** : faible perméabilité (barrages, réservoirs)
- **Type C** : peu ou pas armé (massifs de fondation).

---

On peut aussi les classer suivant leur densité en trois catégories :

### I.2.1 Bétons Ordinaires (2100 à 2400 kg/m<sup>3</sup>)

- Grande masse
- Béton armé d'ossatures de bâtiment
- Béton étanche
- Béton de grands ouvrages
- Préfabriqué précontraint
- Pistes, routes, aérodromes.

### I.2.2 Bétons légers (600 à 1800 kg/m<sup>3</sup>)

Ils sont destinés principalement à la confection des parpaings, éléments préfabriqués, cloisons, ... Ces béton ont l'avantage d'améliorer l'isolation thermique et phonique des constructions. On distingue :

- Les bétons caverneux (sans sable)
- Les bétons cellulaires (obtenus par dégagement gazeux)
- Les bétons de granulats légers (laitier, argile et schiste expansé).

### I.2.3 Bétons lourds (3500 à 4500 kg/m<sup>3</sup>)

Ils sont utilisés pour la protection contre les rayons X. Les granulats employés sont lourds.

## I.3 METHODES DE COMPOSITION DU BETON

L'étude de la composition granulaire d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose (sables, gravillon, gravier, cailloux), 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; elles aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux » le passage de l'un à l'autre pouvant toujours 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 aux plus gros grains des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées (*Exemple* : béton constitué d'un sable 0/5 mm et de deux graviers 5/25 mm et 20/40 mm ; courbe **A** sur la figure V.1)

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 20/40 mm; courbe **B** sur la figure V.1).

Ce deux types de béton « continu » ou « discontinu » ont chacun leurs chaud partisans ou détracteurs. En fait, il n'y a pas entre ces deux types de granularité, et malgré les apparences, de profondes déférences justifiants la querelle encore persistante à leur égard; d'ailleurs dans la plupart des cas la continuité et la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités ; 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

LE NOUVEAU GUIDE DU BÉTON

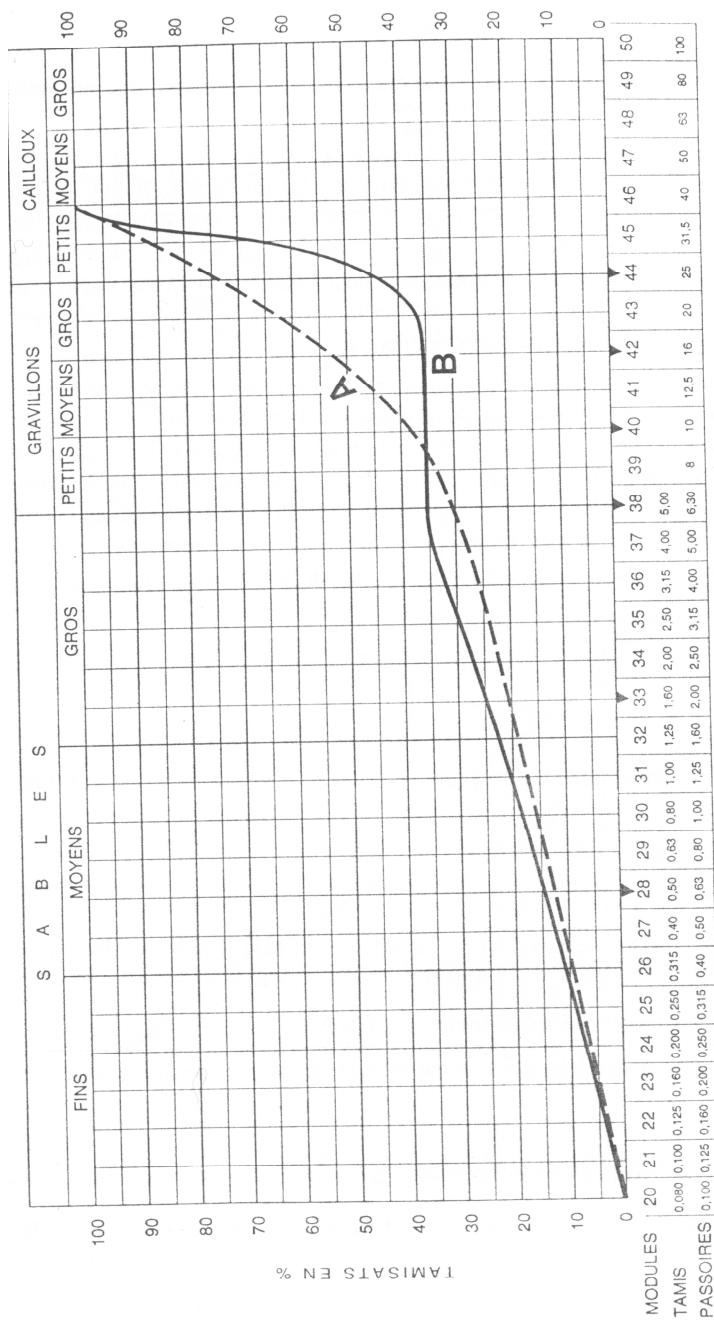


Fig. III-1 — Analyse granulométrique.  
 Courbes granulaires continue (A) et discontinue (B) pour des bétons pour lesquels  $D = 40$  mm.

Une méthode de composition du béton pourra être considérée comme satisfaisante si elle permet de réaliser un béton répondant aux exigences suivantes :

- Le béton doit présenter, après durcissement, une certaine résistance à la compression.
- Le béton frais doit pouvoir facilement être mis en œuvre avec les moyens et méthodes utilisées sur le chantier.
- Le béton doit présenter un faible retrait et un fluage peu important.
- Le coût du béton doit rester le plus bas possible.

Dans le passé, pour la composition du béton, on prescrivait des proportions théoriques de ciment, d'agrégat fin et d'agrégat grossier. Mais l'élaboration des ciments ayant fait des progrès considérables, de nombreux chercheurs ont exprimé des formules en rapport avec les qualités recherchées:

- minimum de vides internes, déterminant une résistance élevée;
- bonne étanchéité améliorant la durabilité
- résistance chimique;
- résistance aux agents extérieurs tels que le gel, l'abrasion, la dessiccation.

Le béton peut varier en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ces performances et par son aspect.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés.

Dans la composition d'un béton, les deux relations importantes suivantes interviennent:

- La somme des poids des constituants de 1 m<sup>3</sup> de béton fini est égal au poids de 1 m<sup>3</sup> de béton fini. Si le ciment (C), l'eau (E) et les granulats (Gi) sont les poids des constituants en kg par m<sup>3</sup> de béton fini et Δ. la densité du béton en place, on a :

$$C + E + (\Sigma G_i) = 1000$$

- Le volume occupé par les constituants de 1 m<sup>3</sup> de béton est égal à 1 m<sup>3</sup>. Si (C), (E) et (Gi) sont les volumes absolus des constituants en litres par m<sup>3</sup> de béton fini, on a :

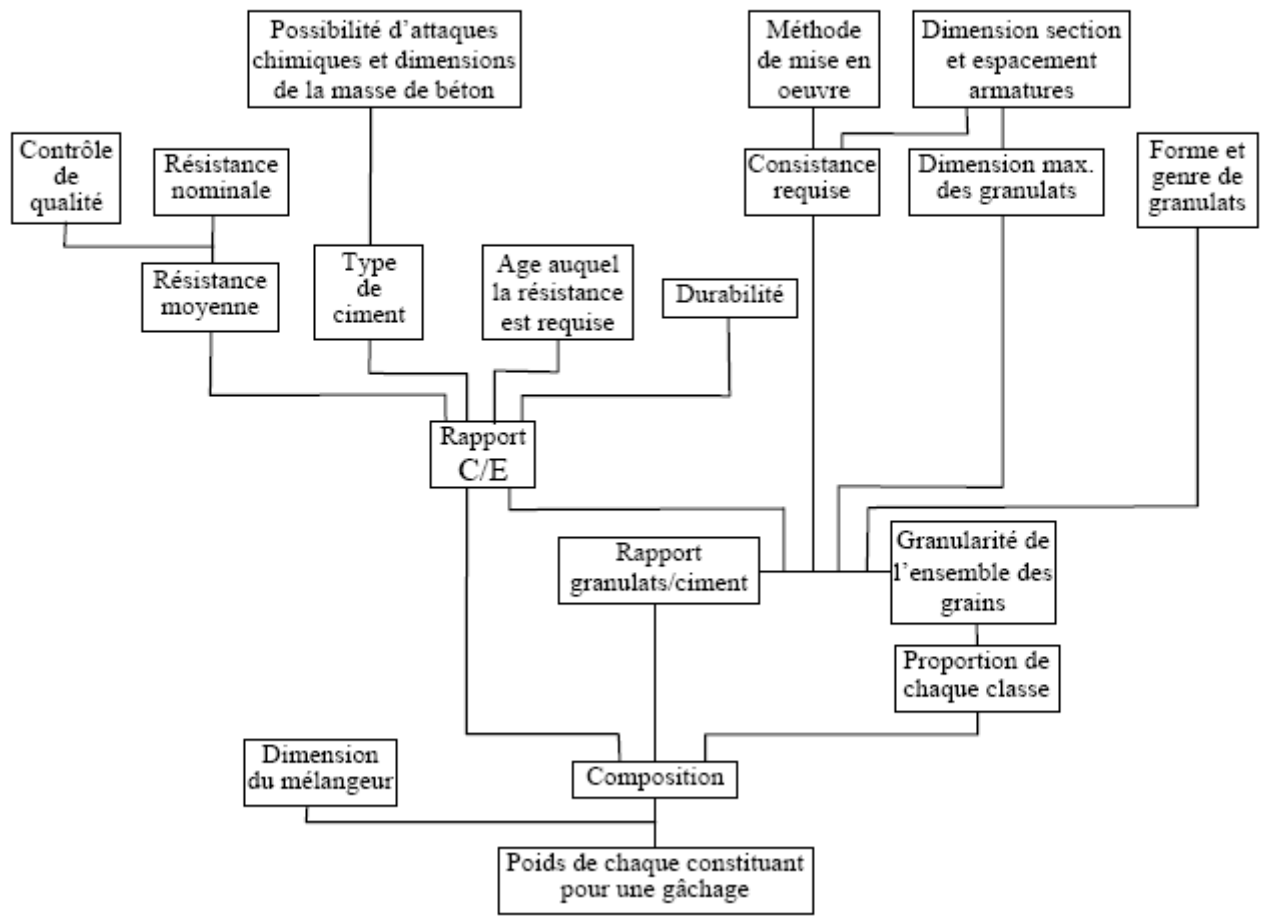
$$C + E + (\Sigma G_i) + V = 1000$$

Il est avantageux d'écrire ces deux relations sous forme tabulaire :

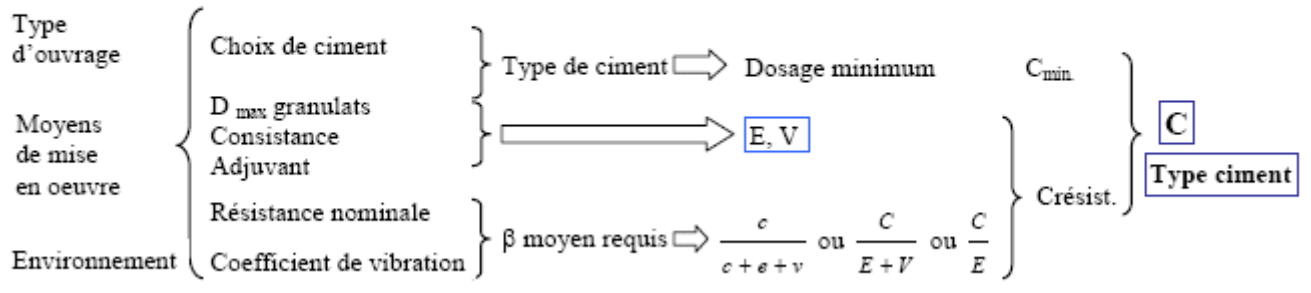
Tableau V.1: Le dosage des constituants de béton en poids et en volumes absolus

CONSTITUANTS	DOSAGE EN POIDS (kg)		Masse spécifique (kg/dm <sup>3</sup> )	DOSAGE EN VOLUMES ABSOLUS en L/m <sup>3</sup>
	par gâchée de "α" m <sup>3</sup>	par m <sup>3</sup>		
- Ciment	α C	C	γ <sub>C</sub>	c = C/γ <sub>C</sub>
- Eau	α E	E	1	e = E
- Granulats 1	α G1	G1	γ <sub>G1</sub>	g1 = G1/γ <sub>G1</sub>
- Granulats 2	α G2	G2	γ <sub>G2</sub>	g1 = G1/γ <sub>G2</sub>
- Granulats 3	α G3	G3	γ <sub>G3</sub>	g1 = G1/γ <sub>G3</sub>
- Air	----	----	----	v
Σ	1000αΔ	1000 Δ	----	1000

**DONNEES ET FACTEURS DE BASE**



**Etude de la composition**



$C + E + \Sigma G = 1000\Delta$	CIMENT	$\gamma_C$	----	----
	EAU	1.00	----	----
$c + e + \Sigma g + v = 1000$	GRANULATS (1,2)	$\gamma_G$	----	----
	AIR	-	-	----
			1000 $\Delta$	1000

⇒  $\Sigma G$

Courbes granulométriques  $G_1 = p_1 \Sigma G, G_2 = p_2 \Sigma G, \dots, G_i = p_i \Sigma G$

**Essai de gâchage**

- Béton frais : mesure  $\Delta$  (contrôle des dosages effectifs) mesure plasticité (contrôle de la consistance) mesure teneur en air (contrôle des vides) Fabrication éprouvette (contrôle de  $\beta$  moyen)
- Béton durci: mesure  $\Delta$ , mesure  $\beta$  cube, évolution scléromètre, évolution essai gel, perméabilité, essais spéciaux...

**Corrections**

En fonction des observations, des mesures faites lors de l'essai de gâchage et des résistances mécaniques obtenues, il sera nécessaire d'effectuer des corrections.

**a) Consistance** : Lors de l'essai de gâchage, il est recommandé de ne pas ajouter tout de suite la quantité d'eau totale E prévue. Il est préférable d'ajouter seulement 95 % de E, de mesurer la consistance, puis d'ajouter de l'eau jusqu'à obtention de la consistance prescrite.

**b) Dosage en ciment** : Si le dosage en ciment effectivement réalisé est faux, on devra le corriger. S'il faut rajouter (ou enlever) un poids  $\Delta C$  de ciment pour obtenir le dosage désiré, on devra enlever (ou rajouter) un volume absolu équivalent de sable, soit un poids  $\Delta S$  égal à :

$$\Delta S = \Delta C \cdot \frac{\gamma_{\text{sable}}}{\gamma_{\text{ciment}}} = \frac{2,68}{3,1} \Delta C$$

Si  $\Delta C$  est important, il faudra aussi corriger la quantité d'eau.

**c) Résistances mécaniques** : Si les résistances mécaniques sont insuffisantes, il faudra avoir recours à l'une ou plusieurs des possibilités suivantes :

- Augmenter le dosage en ciment (au-delà de 400 kg/m<sup>3</sup>, une augmentation de dosage en ciment n'a plus qu'une très faible influence sur l'accroissement de résistance).
- Diminuer le dosage en eau sans changer la granulométrie.
- Corriger la granulométrie et réduire la quantité d'eau.
- Utiliser un autre type de granulats.
- Utiliser un adjuvant et réduire la quantité d'eau.
- Utiliser un ciment à durcissement plus rapide.

On devra en tous cas toujours veiller à ce que la consistance du béton permette une mise en œuvre correcte.

**I.3.1 Règle volumétrique :**

Cette règle, indiquée dans la circulaire du ministère T.P du juillet 1930, est la suivante :

- 800 l de pierrailles
- 400 l de sable
- 300, 350 ou 400 kg de ciment

Sur un petit chantier où l'on fabrique artisanalement et souvent bien son béton l'on utilise le vieux principe: 2/3 de gros éléments et 1/3 d'éléments fins, soit 800 litres de gravillons et 400 litres de sable par mètre cube de béton pour 350 à 400 kg de ciment. La quantité d'eau de gâchage varie trop souvent au gré du savoir-faire du maçon, la nature de ciment, l'humidité du granulat passant après la consistance du béton à obtenir.

**I.3.2 Méthodes des courbes de référence**

Elles sont données par ordre chronologique

**I.3.2.1 Méthodes de FULLER –THOMPSON**

**FULLER et THOMPSON** ont donné en 1907 une courbe granulométrique continue de référence. Ils ont proposé, pour les agrégats seuls, sans ciment, une courbe d'équation :

$$P\% = 100 \left( \frac{d}{D} \right)^m$$

P : % en poids de granulats passant à travers la passoire de diamètre d(en mm).

D : diamètre du plus gros grain (en mm)

L'exposant « m » est voisin de 0,5 d'où la parabole de **FULLER**

### I.3.2.2 Méthodes de BOLOMEY

C'est une méthode à granularité continue. La courbe de référence a pour équation :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Où :

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre  $d$ ,

D : est le diamètre du plus gros grain,

A : est un coefficient dépendant de la plasticité cherchée ; qui varie de 8 à 16 :

A = 10 Pour les bétons peu plastiques

A = 12 Pour les bétons plastiques (galets ronds naturels)

A = 14 Pour les bétons plastiques (matériaux concassés).

Cette formule permet le tracé de la courbe de référence et il convient alors de réaliser avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale dont la courbe soit aussi proche que possible de la parabole théorique de référence. L'eau de gâchage se détermine expérimentalement.

Cette dernière méthode simple a été très employée, et l'est encore dans certains laboratoires.

Ces deux méthodes ne tiennent compte ni de la mise en place, ni des moyens de serrage, ni de l'effet de paroi. La méthode de **FULLER – THOMPSON** manque en particulier d'éléments fins (surtout pour desserrage mayens) alors que celle de **BOLOMEY** donne souvent une proportion de fins assez importante.

### I.3.2.3 Méthode de FAURY

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type « continu »

Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de  $\sqrt[5]{d}$  ; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en  $\sqrt[5]{d}$ . La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ( $< D/2$ ) des gros grains ( $> D/2$ ) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc pour l'ensemble du mélange, ciment compris, une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en  $\sqrt[5]{d}$ . L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à  $D/2$  et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Le paramètre A se choisit dans le tableau suivant (tableau V.2) et D est exprimé en dimension passoire.

B varie de 1 à 2 selon que le béton est teinté ou mou.

R est le rayon moyen du moule.

En choisissant des valeurs moyennes pour les paramètres A.B et R la valeur moyenne de Y est de l'ordre de 60% pour  $D = 16$  mm et de 75 c; pour  $D = 100$  mm.

Pour un béton un béton  $D=25$  mm les valeurs extrêmes de Y sont :

**Valeurs maximale** : consistance très fluide, sans serrage, granulats concassés, effet de paroi important :

$$Y = 38 + 17\sqrt[5]{25} + \frac{2}{1 - 0,75} = 78\%$$

**Valeurs minimale** : serrage exceptionnellement puissant, granulats roulés ; effet de paroi négligeable.

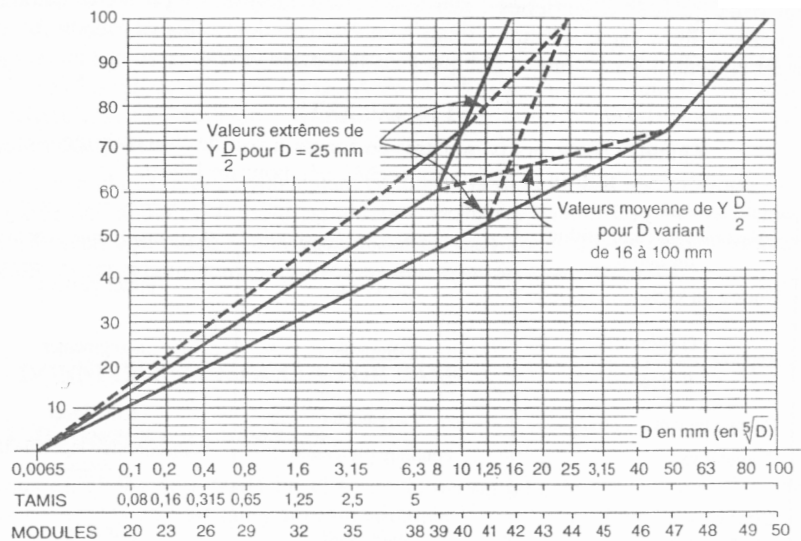
$$Y = 38 + 17\sqrt[5]{25} = 54\%$$

**Tableau I.1**

Valeur de A

	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulés et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide. Mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage.	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	au-dessous de 22 (à déterminer dans chaque cas)	au-dessous de 24 (à déterminer)	au-dessous de 28 (à déterminer)

Ces valeurs donnent les deux courbes de références tracées sur la figure I.2



**Figure : I.2** Courbes de référence Faury.

Nous nous inspirerons de cette méthode quant au tracé d'une courbe granulaire de référence suivant deux droites définies par leur point de brisure, mais nous le ferons pour les granulats seuls (sans le ciment), ce qui simplifie beaucoup les choses ; le dosage en ciment est en effet, dans la pratique, affaire de résistance et non de granularité.

### I.3.3 AUTRES METHODES

#### I.3.3.1 Méthode 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.

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams sont indiqués dans le tableau V.2 en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulats le plus gros.

**Tableau I.2 : Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants.**

Dosage en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6.00
300	4.20	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.30	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

Nous rappelons ici la règle du mélange d'Abrams : elle permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de modules de finesse  $M_{f1}$  et  $M_{f2}$  pour obtenir un module  $M_f$  choisi pour le mélange,

A titre d'exemple, prenons un gravier 5/20 mm de module  $M_{f1}=6.50$  et un sable 0/5 mm de module de finesse  $M_{f2}=2.60$  ; choisissons pour le mélange de sable et gravier un module de finesse  $M_f=5.00$  par exemple (dosage en ciment 300 kg/m<sup>3</sup>).

$$\text{Soit : } S_1 = M_{f1} - M_f = 6.50 - 5.00 = 1.50$$

$$S_2 = M_f - M_{f2} = 5.00 - 2.60 = 2.40$$

$$S_1 + S_2 = 3.90$$

$$\text{Proportion de sable : } \frac{S_1}{S} = \frac{2.40}{3.90} = 38\%$$

$$\text{Proportion de gravier : } \frac{S_2}{S} = \frac{2.40}{3.90} = 62\%$$

Tout réside donc, dans cette méthode, sur le choix judicieux du module de finesse du mélange à réaliser (avec des granulats seuls). Ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que : forme, nature et dimension des granulats, dosage en ciment, résistance et plasticité désirée, etc.

Nous nous inspirons de cette méthodes mais plus particulièrement pour l'étude de granularité des sables ( $D \leq 5\text{mm}$  en principe).

### I.3.3.2 Méthode de VALLETTE

R. Vallette 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 ».

La méthode Vallette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes. Voici sommairement résumé le principe de cette méthode.

Dans les cas les plus courants, on partira en général de deux granulats (bétons binaires) : un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple.

On calcule d'abord le dosage de sable et ciment devant donner en principe le mortier plein à minimum de ciment; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur sur la « convenance » du béton; il doit donc être un praticien connaisseur en la matière. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment). Les dosages en ciment auxquels on aboutit ainsi sont presque toujours très nettement au-dessous

des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées, la plasticité nécessaire, l'étanchéité ou autres qualités. Pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir, on fixe a priori, dans certains cas, ou on évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein mouillé de sable.

Nous nous inspirerons de cette méthode quant à son côté expérimental, la formule de composition que nous aurons calculée devant être nécessairement testée par des essais d'études et de convenance.

### **I.3.3.3 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 est fonction de  $\sqrt[m]{d}$ ,  $m$  dépendant de la compacité avec laquelle se serre un granulat 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  $\sqrt[3]{d}$  (Faury) mais à  $\sqrt[m]{d}$ ,  $m$  variant avec le serrage des matériaux.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse  $D/2$  - Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle  $(D/2)/D$  de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode mais, en revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une étude à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons que se détermine les pourcentages des divers granulats.

Comme pour les méthodes Faury et Vallette le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement - sur le plan granulométrique, à la compacité maximale; ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200 kg/m<sup>3</sup>) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400 kg/m<sup>3</sup> dans la plupart des cas). Une correction doit donc être apportée dans ce sens.

## **I.4 METHODE PRATIQUE POUR LA COMPOSITION DES BETON**

Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié. Toutefois, seuls quelques gâchées et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition définitive en fonction des qualités souhaitées et des matériaux utilisés.

### **I.4.1 Données de base**

#### ***I.4.1.1 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...

#### ***I.4.1.2 Résistance souhaitée***

En général on demandera une résistance  $f_{C28}$  en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique  $S$ , il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours :

$$f_c \text{ Supérieure à } f_{C28}$$

Car

$$f_{C28} = f_c - 0,8S$$

Si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 20 %, on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser :

$$f_c \approx f_{c28} + 15\%$$

#### I.4.1.3 Consistance désirée

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massif ou plus ou moins ferrillé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué dans le tableau V.2

Tableau I.2

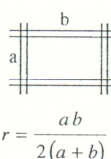
Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S.

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	N nombre de chocs test C.E.S.
Béton très	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

#### I.4.2 Dimension maximale des granulats

Compte tenu de l'efficacité des moyens actuels de vibration et de la tendance à faire des bétons plus plastiques, ces valeurs de D sont peut-être un peu restrictives ; il ne faut pas oublier que les éléments de dimension Dmax sont peu nombreux et que, là où ils ne passeraient pas, tout le reste passe à condition d'un G/S pas trop élevé et d'une bonne ouvrabilité, ce qui correspond à la tendance actuelle.

Évaluation approximative de D dimension maximale (Tamis) des granulats, en fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner cl de l'ambiance plus ou moins agressive :

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D (Tamis)	
$e_h$ espacement horizontal entre armatures .....		$\leq \frac{e_h}{1,5}$	
$e_v$ espacement vertical entre armatures .....		$\leq e_v$	
c distance des armatures de coffrage	ambiance très agressive .....	$\geq 5$ cm	
	ambiance moyennement agressive, condensations .....	$\geq 3$ cm	
	ambiance moyennement agressive mais		
	$f_{c28}$ du béton supérieure à 40 MPa .....	$\geq 2$ cm	
	ambiance non agressive .....	$\geq 1$ cm	
 $r$ rayon moyen du ferrillage Granulats roulés .....		$\leq 1,4 r$	
		Granulats concassés .....	$\leq 1,2 r$
$h_m$ hauteur ou épaisseur minimale .....		$\leq \frac{h_m}{5}$	

#### I.4.3 Dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport  $\frac{C}{E}$  en fonction de la résistance moyenne désirée  $f_c$ .

$$f_c = GF_{CE} \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec

$f_c$ , résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,

$F_{CE}$ , classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,

$C$ , dosage en ciment (en  $\text{kg/m}^3$ ),

$E$ , dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour  $1 \text{ m}^3$ ),

$G$ , coefficient granulaire (tableau I.3).

**Tableau I.3**

Valeurs approximatives du coefficient granulaire  $G$ . Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

<i>Qualité des granulats</i>	<i>Dimension D des granulats</i>		
	<i>Fins</i> ( $D \leq 16mm$ )	<i>Moyens</i> $25 \leq (D \leq 40mm)$	<i>Gros</i> ( $D \geq 63mm$ )
<i>Excellente.....</i>	0,55	0,60	0,65
<i>Bonne, courante....</i>	0,45	0,50	0,55
<i>Passable.....</i>	0,35	0,40	0,45

**Dosage minimal**

Les dosages minimaux en fonction de l'environnement, sont :

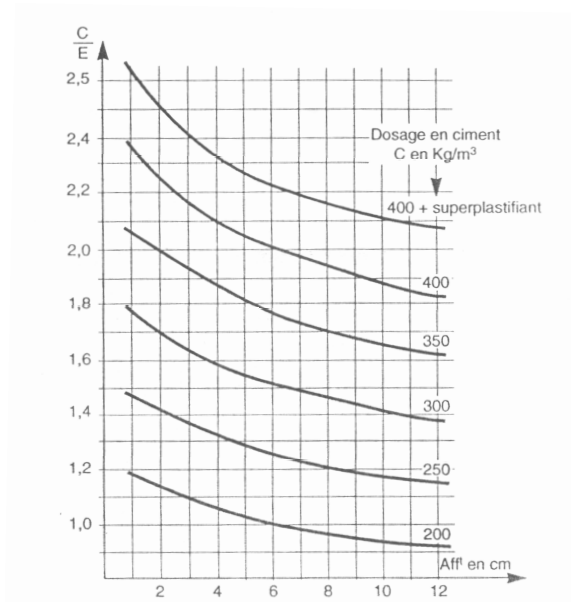
- En béton armé exposé à un milieu sans agressivité particulière :  $C \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}}$ , ce qui revient à faire varier le dosage minimal entre 315 et 250 Kg de ciment par  $m^3$ , lorsque D varie de 16 à 50 mm.
- En béton armé exposé à un milieu sans agressivité particulière mais comportant un parement fin :  $C \geq \frac{600}{\sqrt[5]{D}}$ , soit un dosage minimal en ciment variant de 345 à 275  $Kg/m^3$ , lorsque D varie de 16 à 50 mm.
- En béton armé exposé à des conditions agressives sévères ou coulé sous l'eau, ainsi qu'en béton précontraint :  $C \geq \frac{700}{\sqrt[5]{D}}$  correspondant à un dosage minimal variant de 400 à 320  $Kg/m^3$  lorsque D varie de 16 à 50 mm.

D'autres textes réglementaires donnent également des indications sur les dosages, notamment la norme AFNOR P 18 011, mais les valeurs précédentes représentant pratiquement la synthèse des différents documents, on peut se limiter à ces spécifications.

Nous avons indiqué dans le tableau ci-dessous, les dosages auxquels conduisent l'application des formules précédentes ainsi que les valeurs de R/D en fonction de D.

<b>D (Passoire) en mm</b>	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100
$\sqrt[5]{D}$	1,38	1,45	1,52	1,59	1,66	1,74	1,82	1,90	2,00	2,09	2,19	2,29	2,40	2,51
$\frac{550}{\sqrt[5]{D}}$	400	380	362	346	332	316	302	290	275	263	251	240	230	220
$\frac{600}{\sqrt[5]{D}}$	435	415	395	378	362	345	33	315	300	288	275	262	250	240
$\frac{700}{\sqrt[5]{D}}$	500	480	460	440	420	400	385	370	350	335	320	305	290	280

Il ne suffit pas alors, connaissant C/E, de fixer arbitrairement le dosage en ciment et d'en déduire le dosage en eau E; en effet, en choisissant par exemple, un faible dosage en ciment, on trouvera un dosage en eau faible; on risquera alors d'obtenir un béton beaucoup trop sec (cl vice versa). Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure I-3 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

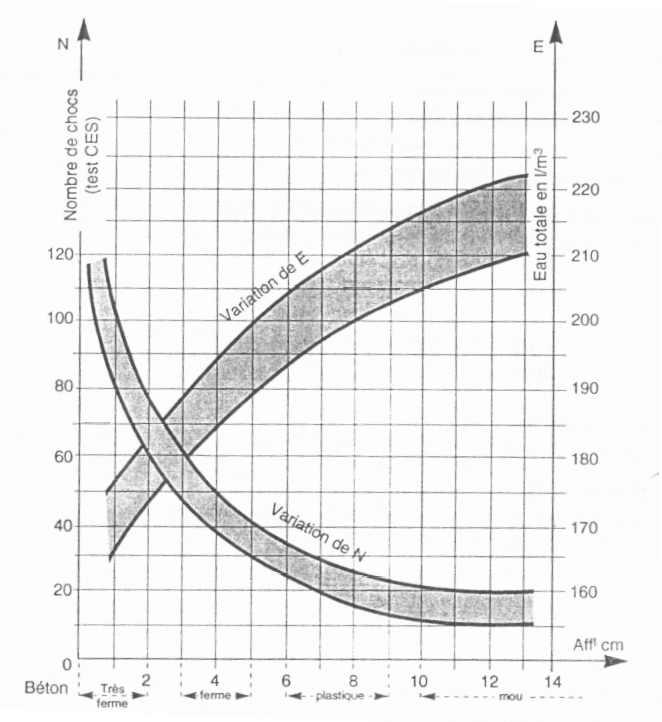


**Fig. I-3 - Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).**

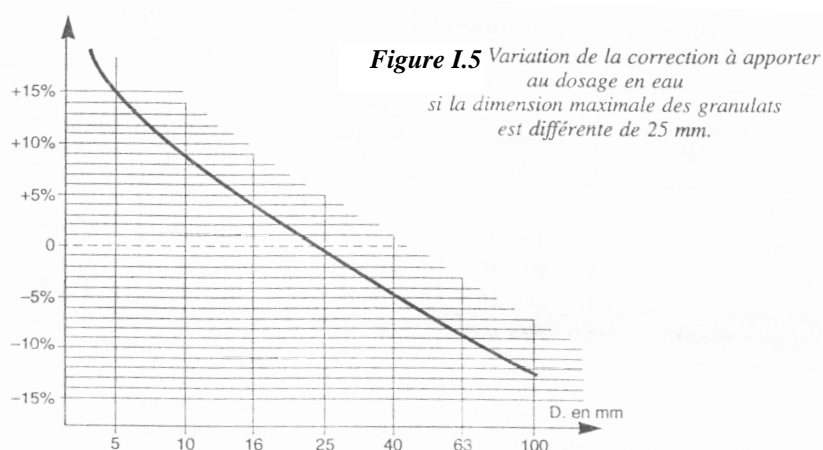
#### I.4.4 Dosage en eau

Ayant fait choix du dosage en ciment C, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité.

L'abaque de la figure V-4 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 par des essais sur éprouvettes que les divers éléments constitutifs, et l'eau tout particulièrement, peuvent être définitivement dosés.



**Fig. I-4 - Variations relatives moyennes du dosage en eau E et du nombre de chocs du test d'ouvrabilité C.E.S, en fonction de l'affaissement, dans le cas des bétons composés suivant la présente méthode (le dosage en sable augmentant quand le dosage en ciment diminue).**



### Correction du dosage en eau totale en fonction de D

Les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons pour lesquels 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 correspondant à  $D = 25$  mm peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau V.4 en fonction de D.

**Tableau I.4**

Correction en pourcentage sur le dosage en eau (fig. V-4) en fonction de la dimension maximale D des granulats (si  $D \neq 25$  mm).

<b>Dimension maximale des granulats D en mm</b>	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (en%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Le graphique de la figure I-5 donne l'allure générale de cette correction.

### Dosage en eau réel

La quantité d'eau totale (sur matériaux supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, on obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant Veau d'apport (contenue dans les granulats), à l'aide des indications approximatives du tableau I.5 (à défaut de mesures plus précises de la teneur en eau des granulats).

**Tableau I.5**

Teneur en eau approximative des granulats courants en litres pour un mètre cube de matériau (en volume apparent).

<b>Degré apparent d'humidité</b>	<b>Eau d'apport en <math>\ell/m^3</math></b>			
	<b>Sable 0/5</b>	<b>Gravillon 5/12,5</b>	<b>Gravier 5/20</b>	<b>Gravier 20/40</b>
<b>Apparence :</b>				
<i>Sèche</i>	0 à 20	Négligeable	Négligeable	Négligeable
<i>Humide</i>	40 à 60	20 à 40	10 à 30	10 à 20
<i>Très humide</i>	80 à 100	40 à 60	30 à 50	20 à 40
<i>Saturée, égouttée</i>	120 à 140	60 à 80	50 à 70	40 à 60

**Nota :** Ces valeurs résultent de mesures réelles faites sur des stocks de granulats exposés aux intempéries mais ne sont valables que pour les silico-calcaires du bassin de la Seine (ou matériaux équivalents).

### I.4.5 Qualité des granulats

Les graviers doivent être de bonne qualité minéralogique, suffisamment durs et bien propres, mais la forme de leur courbe granulométrique, plus ou moins concave, a une influence relativement moins importante que celle du sable.

Le sable est l'élément qui a sur le béton, selon ses qualités, une influence prépondérante :

- sa propreté sera vérifiée par l'essai d'équivalent de sable.
- son module de finesse sera calculé : somme des refus (en pourcentages ramenés à l'unité) sur les tamis de module 23, 26, 29, 32, 35, 38, et il est souhaitable d'avoir une valeur comprise entre 2,2 et 2,8 ;
- sa courbe granulométrique sera comparée avec le fuseau optimal représenté sur la figure IV.7, (page 7, chapitre IV) et en cas de nécessité, il sera apporté, si possible, une correction par l'ajout d'un sable fin, d'un plastifiant ou d'un entraîneur d'air, si par exemple, le sable en question est trop grossier. (Module de finesse  $\geq 3,0$  ).

#### Correction éventuelle du module de finesse du sable

On pourra utiliser la règle d'Abrams : supposons par exemple que Ton dispose d'un sable  $S_1$ , de module de finesse trop fort  $M_{f1}$ , et que l'on désire y ajouter un sable fin  $S_2$  de module de finesse  $M_{f2}$ , afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse serait  $M_f$ , les proportions des deux sables composant devront être les suivantes :

- Proportion du sable  $S_1$   $S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$
- Proportion du sable  $S_2$   $S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$

#### **Exemple :**

Soit :  $M_{f1} = 3,2$  (sable grossier  $S_1$ )

$M_{f2} = 2,0$  (sable fin  $S_2$ )

$M_f = 2,5$  (sable corrigé  $S$ )

- Proportion du sable  $S_1$   $S_1 = \frac{2,5 - 2,0}{3,2 - 2,0} = 42\%$
- Proportion du sable  $S_2$   $S_2 = \frac{3,2 - 2,5}{3,2 - 2,0} = 58\%$

### V.4.6 Tracé de la courbe granulométrique de référence

Elle doit être tracée sur une feuille d'analyse granulométrique (papier semi-logarithmique). Le ciment n'est pas inclus dans la courbe. Celle-ci est composée de deux segments « OA » et « AB » avec brisure en A.

- **En abscisse (à partir de la dimension  $D$  tamis)**

Si  $D \leq 20mm$  l'abscisse est de  $D/2$

Si  $D \geq 20mm$  l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5mm) et le module correspondant à  $D$ .

- **En ordonnée :**

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

**K** : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (et c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) et également du module de finesse du sable.

Les valeurs (k) sont indiquées dans le tableau I.6:  $K = 0$  pour un béton courant dosé en ciment à  $350 \text{ kg/m}^3$  composé de granulats roulés, le module de finesse du sable étant de 2.5 et le serrage étant effectué avec une vibration normale.

Par exemple, sur la figure I-6 on a pour un béton  $D = 50$  mm et un terme correcteur  $K$  choisi dans le tableau I.6 et supposé égal à  $+ 3$  :

$$Y = 50 - \sqrt{50} + 3 = 46$$

L'abscisse du point de brisure est au milieu du segment  $X_0X_1$  et la ligne brisée OAB représenté la composition granulatoire de référence.

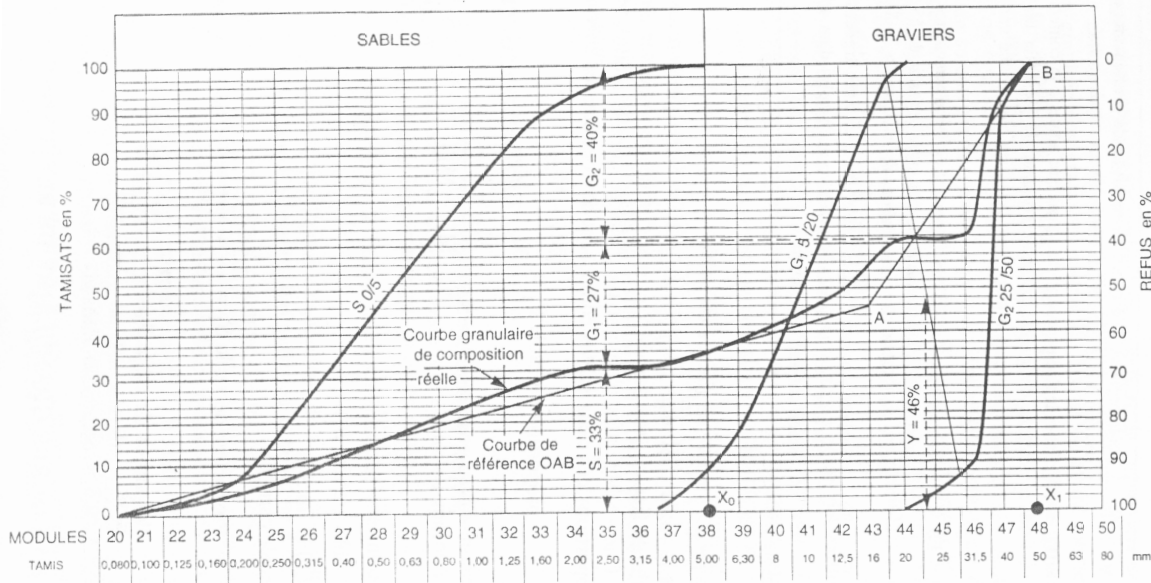


Fig. V-5 – Analyse granulométrique.  
Exemple d'étude de la composition granulatoire d'un béton ternaire discontinu  $D = 50$  mm.

TABLEAU XXIV

Valeur du terme correcteur  $K$  en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer  $Y$  ordonnée du point de brisure de la courbe de référence :

$$(Y = 50 - \sqrt{D} + K)$$

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 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

**Nota 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 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

**Nota 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  $+ 10$  environ, selon le degré de plasticité désiré.

**I.4.7 Coefficient de compacité**

Le coefficient de compacité est le rapport des volumes absolus des matières solides (ciment et granulats,  $V_M = V_g + V_s + V_C$ ) au volume total du béton frais en œuvre soit un mètre cube :

$$\gamma = \frac{V_M \text{ (en litres)}}{1000}$$

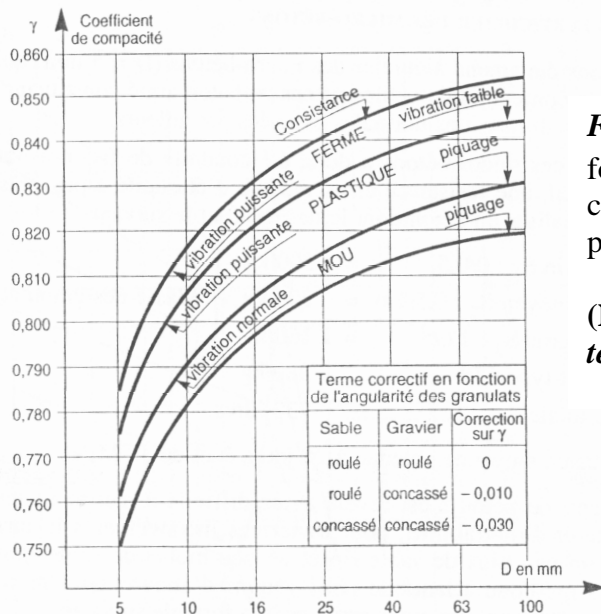
Les valeurs approximative de  $\gamma$  sont indiquées dans le tableau V.7, où l'on peut facilement choisir la valeur de  $\gamma$  la plus probable dans le cas considéré.

Les valeurs de  $\gamma$  varie de 0,750 pour des micros bétons de consistance molle mis en place par simple piquage à 0,855 pour des bétons de cailloux de consistance ferme et bien vibres;  $\gamma = 0.82$  est une valeur moyenne approximative qui peut être prise en général pour des bétons courants (D de 16 à 40 mm) et sous réserve d'une vérification par mesure de densité du béton frais.

**Tableau I.7 Valeurs du coefficient de compacité  $\gamma$**   
(voir la figure I-7)

Consistance	Serrage	$\gamma$ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	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.....	0,730	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.....	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

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 concassé = - 0,03.



**Fig.I-7-** Variation du coefficient de compacité  $\gamma$  en fonction de la grosseur maximale des granulats, de la consistance, et de l'efficacité des moyens de serrage et pour des granulats roulés.

**(Nota. Si les granulats sont concassés, appliquer le terme correctif du tableau ci-dessus)**

**I.4.8 Dosage des granulats**

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du premier, au point de 5 % de la courbe du granulat suivant et ainsi de suite.

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 absolu des grains de ciment est :

$$c = \frac{C}{3,1}$$

(En admettant une masse spécifique de 3,1 pour les grains de ciment, valeur moyenne habituellement admise).

On choisira dans le tableau V.7 une valeur convenable du coefficient de compacité  $\gamma$  en fonction de  $D$ , de la consistance et de l'efficacité du serrage.

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000\gamma - C$$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par suite :

$$v_1 \succ g_1 V, v_2 \succ g_2 V, v_3 \succ g_3 V$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont  $\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2$  et  $\bar{\omega}_3$  les masses de chacun d'eux seront :

$$p_1 = v_1 \bar{\omega}_1$$

$$p_2 = v_2 \bar{\omega}_2$$

$$p_3 = v_3 \bar{\omega}_3$$

Masse totale des granulats

## I.5 Caractéristiques principales du béton frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement ou encore utilisent l'énergie potentielle du béton ou nécessitent un apport d'énergie extérieur.

On comprend qu'il est difficile de convenir d'un tel appareil tenant compte de tous les bétons possibles pour tous les usages et qui tiennent compte aussi des différents facteurs de l'ouvrabilité. Certains appareils sont utilisés à la fois par les laboratoires et par les chantiers. La distinction proposée est donc parfois assez artificielle, sauf dans le cas d'appareillage très élaboré.

### I.5.1 L'ouvrabilité du béton frais.

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

#### Affaissement au cône d'Abrams.

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans la norme NF P 18-451 et est schématisé sur la figure V.8. Il se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure.

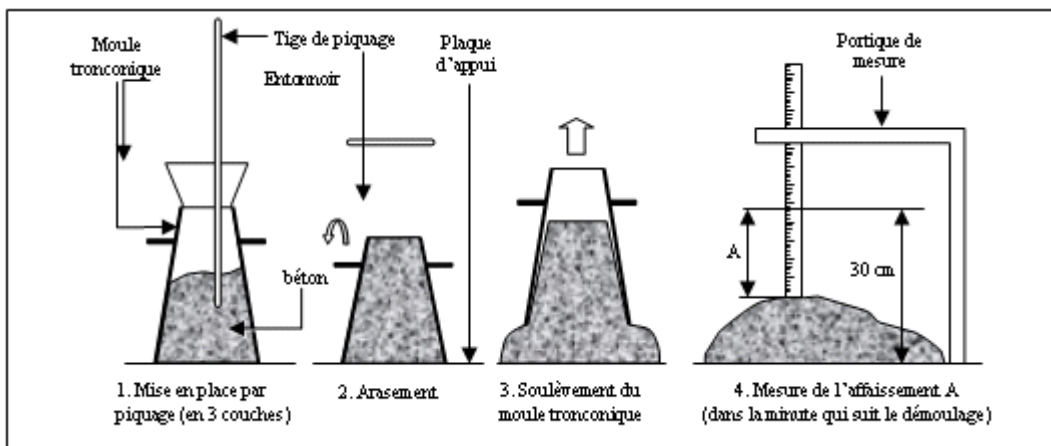


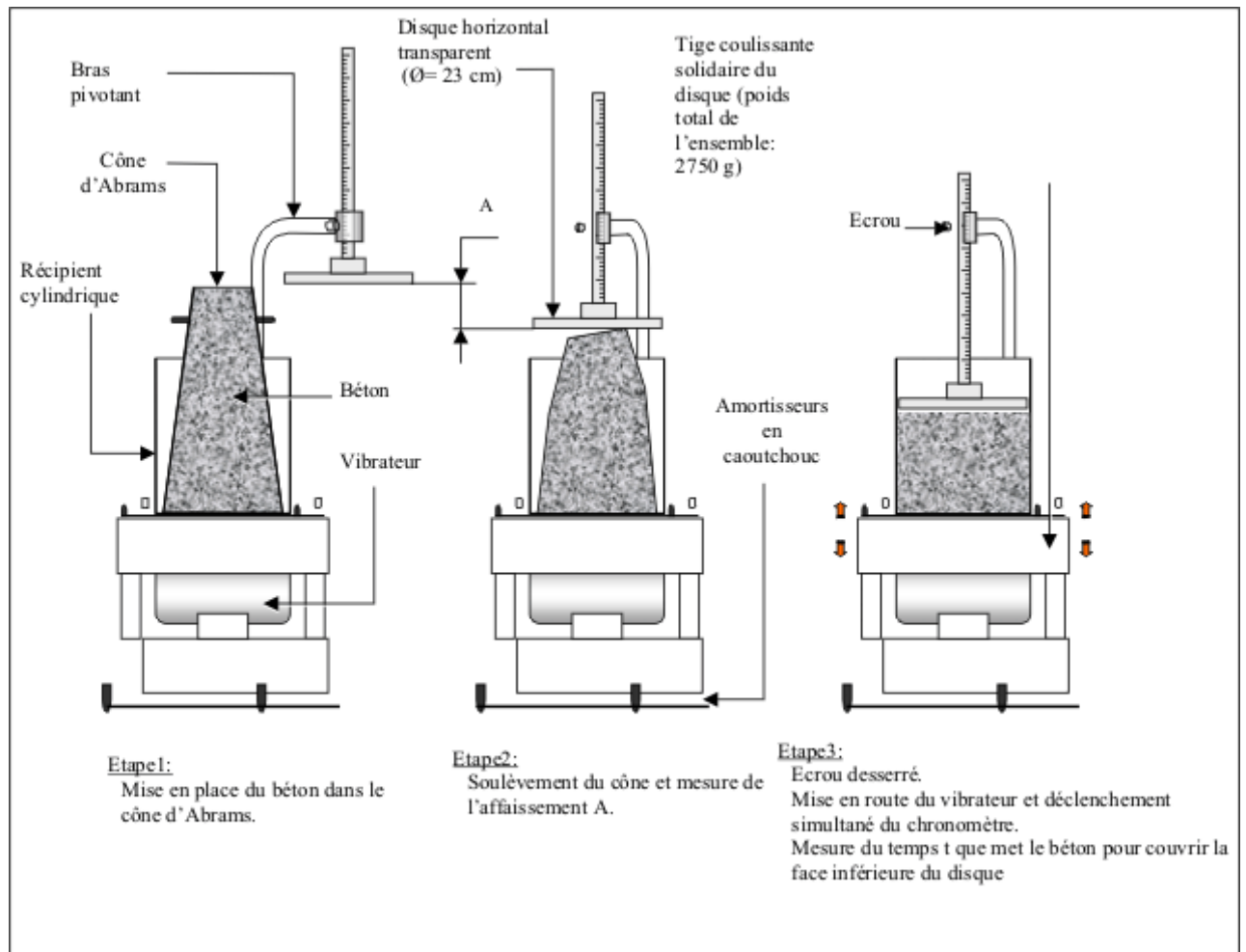
Fig. I.8: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau I.8

Tableau I.8 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au Cône

Classe de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Très plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide F1	≥ 16	

Malheureusement, cet essai ne convient pas pour tester les bétons qui seraient encore plus fermes, plus secs qu'un béton donnant un affaissement presque nul. Dans ce cas-là, il convient de déterminer la consistance du béton frais par une autre méthode, qui s'appelle l'essai Vébé, schématisé sur la figure I.9



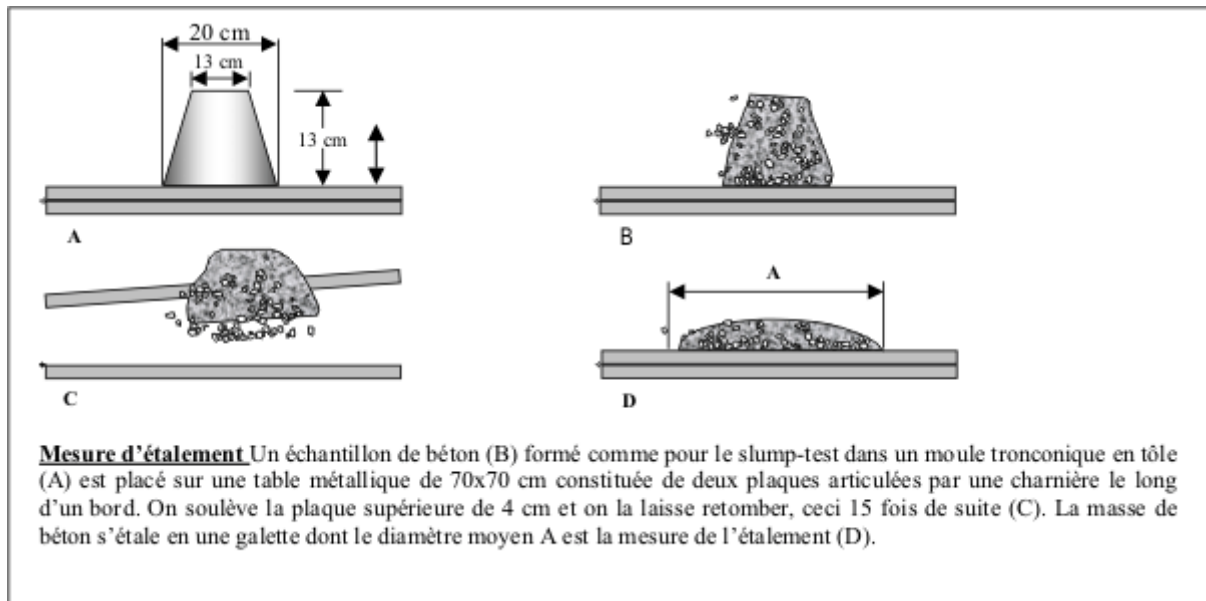
**Fig. I.9: Mesure de la consistance (Essai vébé)**

### Étalement sur table (flow-test)

L'essai d'étalement sur table (Flow-test) consiste à utiliser une table à chocs Fig. I.10 comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical. Un moule tronconique disposé sur cette table et du matériau à étudier (mortier ou béton). Après arasement et démoulage (en soulevant le moule), on donne à la table, à l'aide d'une manivelle, quinze chocs en quinze secondes (hauteur de chute = 12,5 mm). Le matériau s'étale sous forme d'une galette dont on mesure les deux diamètres perpendiculaires. L'étalement (en %) est donné par la formule:

$$\frac{D - D_1}{D} \times 100$$

avec  $D_1$  : diamètre inférieur du moule ;  
 $D$  : diamètre moyen de la galette après étalement.



**Fig. I.10: Mesure de l'affaissement sur table**

C'est un essai très simple utilisable sur mortier ou sur béton (moules et tables de dimensions différentes), aussi bien en laboratoire que sur les chantiers (il est dans ce cas, très utilisé en Allemagne). On peut pour le béton admettre les valeurs données dans le tableau I.9

**Tableau I.9: Les valeurs d'étalement à table**

Ouvrabilité	Étalement à la table (%)
Très ferme	10 – 30
Ferme	30 – 60
Normal	60 – 80
Mou	80 – 100
Très mou à liquide	>100

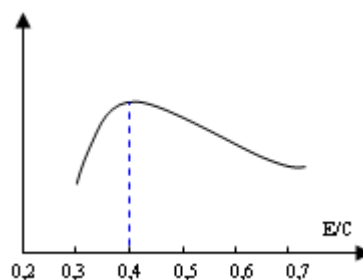
### I.5.2. Résistance du béton frais.

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (avant prise du ciment) d'éléments de grande série. À la suite d'études faites sur ce sujet, il semble que:

- le rapport optimal E/C est voisin de 0,40 (béton plutôt sec),

Sable

- le pourcentage optimal Granulat est d'environ 0,38 (soit :  $G/S = 2,6$  valeur élevée),
- les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés,
- la fréquence de la vibration est prépondérante (résistance triplée quand on passe de 3000 à 6000 périodes par minute).



**FigI.11: Résistance du béton frais**

La résistance en compression peut atteindre 0,3 à 0,4 MPa tandis que celle en traction ne dépasse guère 1/100e de ces valeurs, soit 0,004 MPa.

### I.6 Caractéristiques principales du béton durcissant.

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages.

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, le béton se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et, d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression.

On se préoccupe assez peu de sa durabilité, de son imperméabilité. Très souvent un béton de résistances mécaniques élevées est durable bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée, mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

On verra que la résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation etc. Par ailleurs, la résistance du béton est fonction d'une quantité de facteurs autres que la classe de ciment et qui sont à contrôler et à surveiller dès le choix de la qualité des granulats et tout au long de la chaîne de bétonnage.

La résistance d'un béton est une notion toute relative et elle dépend de la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).

Le tableau I.10 ci-dessous indique les différentes catégories de béton avec les valeurs des résistances caractéristiques auxquelles elles correspondent, ces valeurs étant données pour les résultats obtenus sur cylindres et sur cubes, plusieurs pays de la CEE utilisant les cubes pour le contrôle des résistances à la compression.

Tableau I.10 : Les résistances caractéristiques des bétons

Classe	C12,5/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/45	C45/55	C50/60
$f_{ck}$ cyl.	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck}$ cube	15	20	25	30	37	45	50	55	60

#### I.6.1 La résistance en compression

La résistance en compression à 28 jours est désignée par  $f_{c28}$ . Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 (d = 15,96 cm) dont la section est de 200 cm<sup>2</sup>. La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres d = 15 cm de H = 30 cm.

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées. La résistance sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm (Fig. V.11).

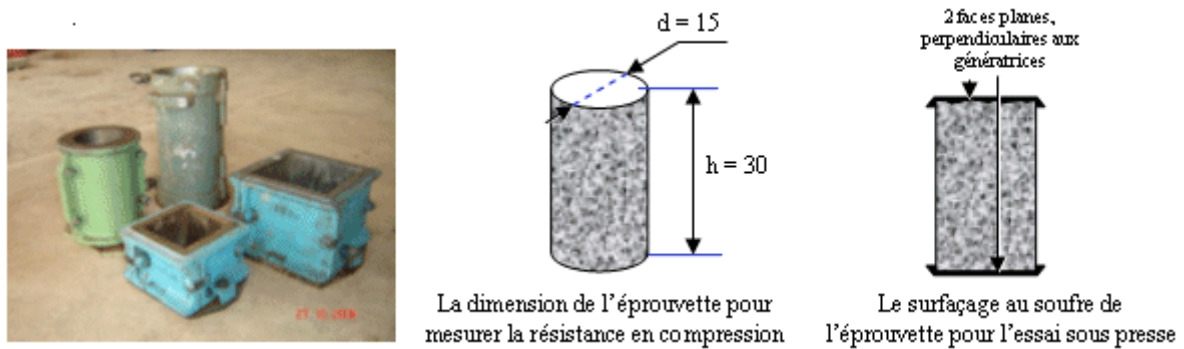


Fig. I.11 : Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression

Le béton de l'ouvrage a des résistances différentes de celles du même béton essayé sur éprouvettes d'essais normalisés (il y a l'effet de masse et une hydratation différente du fait des évolutions des températures elles-mêmes différentes). La résistance en compression est donc à associer à la méthode d'essai (ou à la référence à la norme utilisée) et à l'échéance fixée.

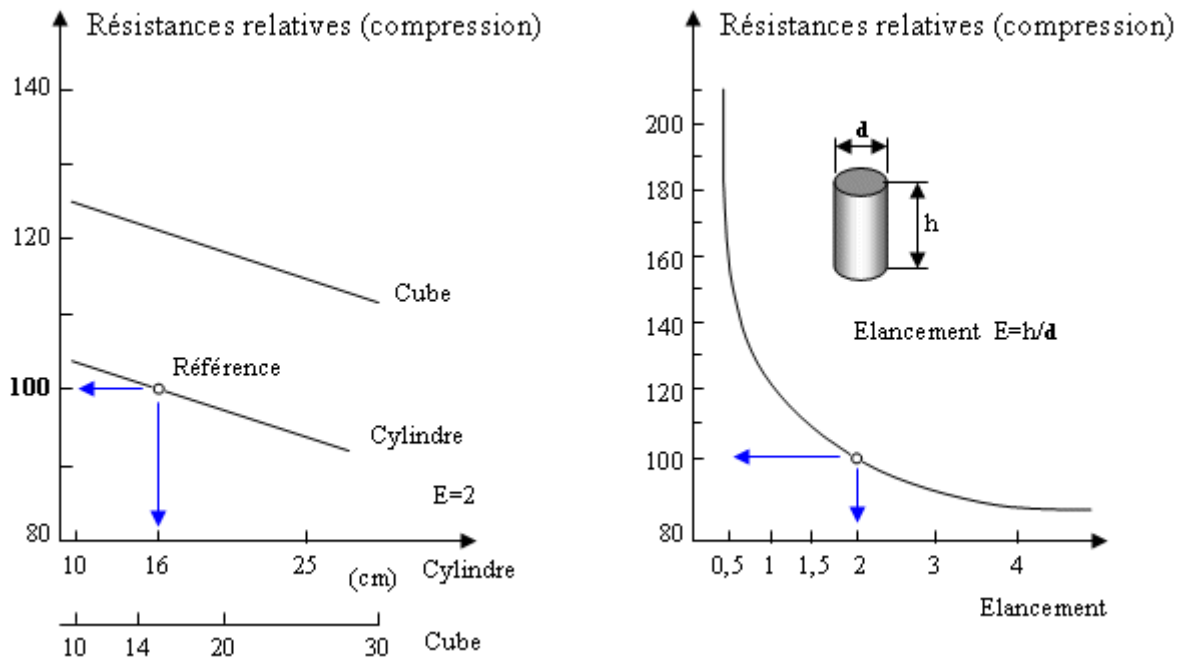


Fig. I.12: Variations des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes

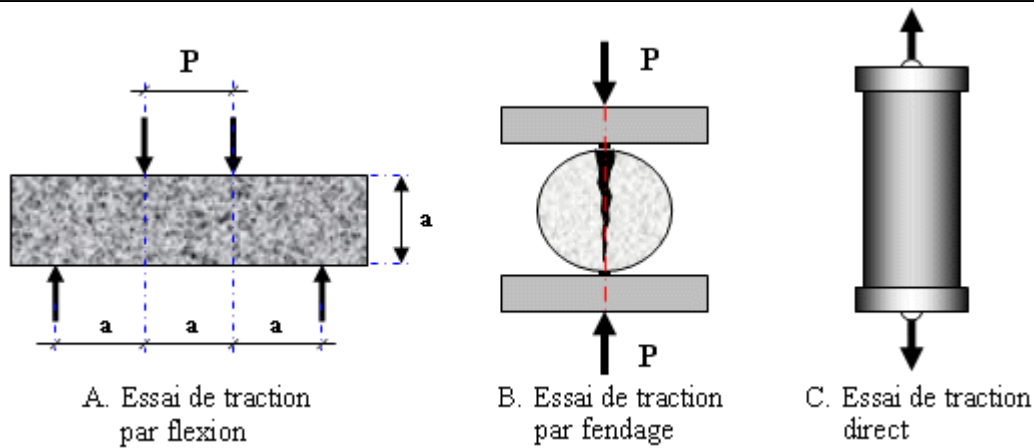
### I.6.2 La résistance en traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par  $ft_{28}$ .

#### La résistance en traction - flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques d'élancement 4, reposant sur deux appuis (Fig.I.12):

- soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges (Fig.I.13)).



FigI.13: Différents essais sur les résistances d'un béton en traction

### La résistance en traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si  $P$  est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

Avec :  $j$  = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;  
 $D$  et  $L$  = diamètre et longueur du cylindre.

### La résistance en traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

## I.7 La déformation des bétons.

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en œuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques.

Dès la fin de la mise en œuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges.

**I.7.1. Le retrait**

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

Causes et constatation	Remèdes
Le <b>retrait</b> avant- <b>prise</b> est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Ils s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d' <b>adjuvants</b> ou de produits de cure.
Après la <b>prise</b> , il se produit : - Le <b>retrait</b> thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de <b>prise</b> du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdoser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de <b>retrait</b> que ceux de classe 55 de <b>durcissement</b> plus rapide.
- Le <b>retrait</b> hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du <b>durcissement</b> de la pâte de ciment. Le <b>retrait</b> croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de <b>retrait</b> qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le <b>retrait</b> ainsi que les impuretés (argiles, limons).

Estimation du **retrait** :  $\Delta l = 3 \text{ ‰} \times L$ .

$\Delta l$  – est le raccourcissement.

L – est la longueur de l'élément.

Si une corniche en béton armé a une longueur de 15 m, le **retrait** est de l'ordre de:  $3 \text{ ‰} \times 15000 \text{ cm} = 0,45 \text{ cm}$ .

**I.7.2. La dilatation**

Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à  $1 \times 10^{-5}$ , pour une variation de  $\pm 20 \text{ °C}$  on obtient:  $\Delta l = \pm 2 \text{ ‰} \times \text{longueur}$ .

Pour chaînage en B.A. de 20 m de longueur et un écart de température de  $20 \text{ °C}$ , on a une dilatation de :  $2 \text{ ‰} \times 2000 \text{ cm} = 0,4 \text{ cm}$ .

**I.7.3. Le fluage**

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau VISCO-ELASTIQUE. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage (Fig. I.13).

Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%. Estimation de la déformation de fluage:

$\Delta l = 4 \text{ à } 5 \text{ ‰} \text{ longueur}$ .

Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

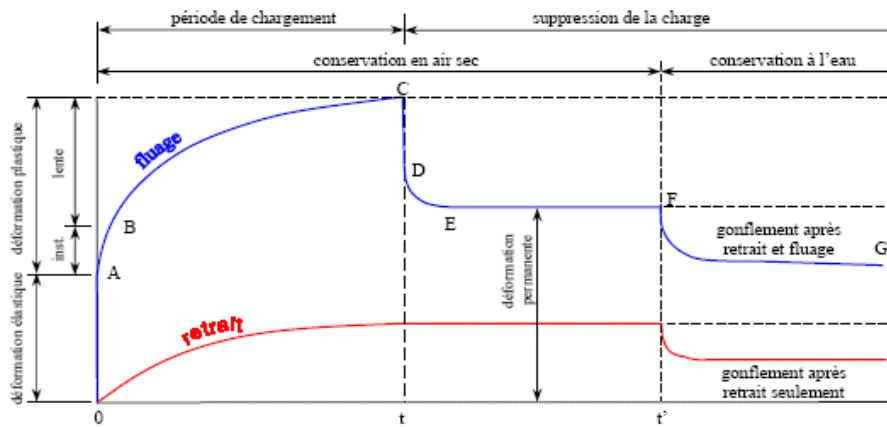


Fig. I.13 : Chargement et déchargement. (Déformation réactive de retour).

### I.7.4. Élasticité du béton

Le module d'élasticité E est défini par le rapport:

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courant, on admet:

$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$  (module de déformation longitudinale instantanée du béton) avec  $f_{cj}$  = résistance caractéristique à « j » jours.  $E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3}$  (module de déformation différée) avec  $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$ . Il s'ensuit que

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} \text{ de } E_{ij}.$$

Notes :  $E_{ij}$ ,  $E_{vj}$ ,  $f_{c28}$ ,  $f_{cj}$  sont exprimés en MPa.

Le module d'élasticité de l'acier est de l'ordre de : 200 000 N/mm<sup>2</sup>, soit 2 000 000 daN/cm<sup>2</sup>.

### V.7.5. Effet «Poisson»

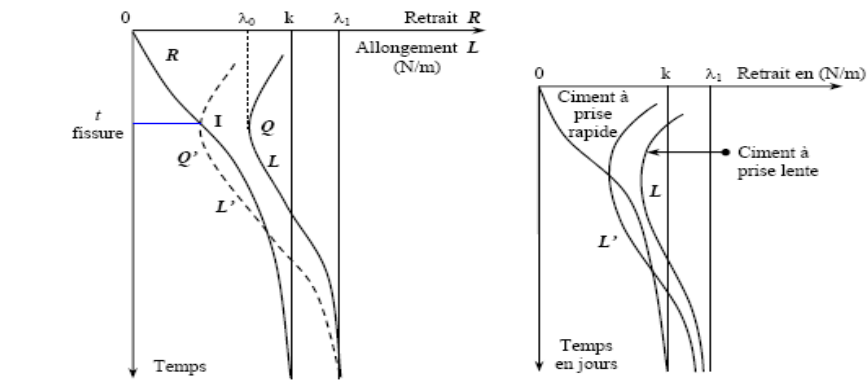
En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale. Le coefficient « Poisson » est le rapport :

$$\frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}} \quad \text{dont la valeur varie entre 0,15 et 0,30}$$

### I.7.6. Mécanisme de la fissuration

Deux bétons ayant un même retrait final peuvent se comporter très différemment du point de vue de la fissuration (fig. I.14) :

- le béton correspondant à L ne se fissure pas ;
- le béton correspondant à L' se fissure en I au temps



t.

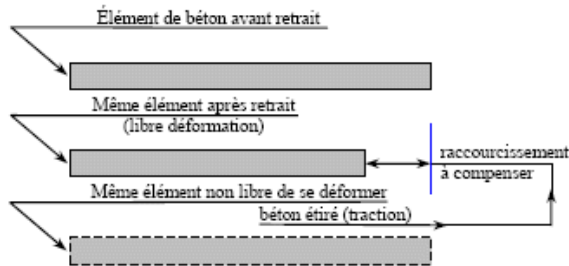


Fig. I.14 : Le retrait du béton est pris en compte dans la conception des ouvrages (Exemple: joints de retrait des dallages et planchers).

**Condition de fissuration d'un béton:**

Le phénomène de retrait étire le béton de telle façon que l'allongement résultant compense le raccordement imposé par le retrait, si l'élément était libre de se déformer. Le retrait augmente avec le temps, la tension interne aussi: si elle dépasse la limite de rupture du béton, la fissuration se produit.