

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Matériaux de Construction

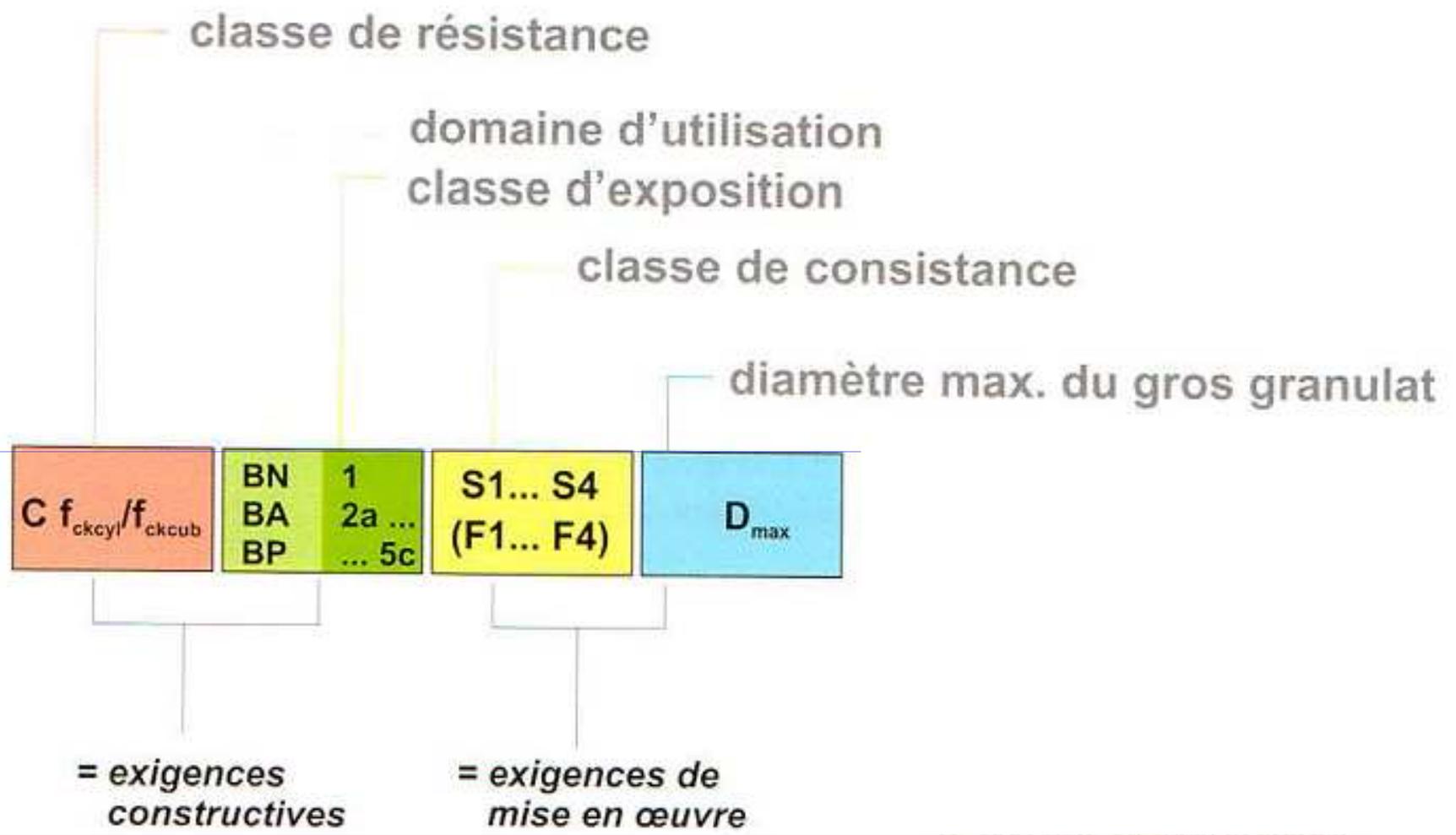
Responsable : Pr. GHOMARI Fouad

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.



Comment déterminer la composition du béton ?

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la raison pour laquelle la démarche retenue comporte le plus souvent deux phases :

Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baron et Lesage). Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.

La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

L'approche de la formulation

Dosage en ciment

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

i., La fonction de liant

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.

ii., La fonction filler : Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

Les abaques de Dreux, exposées au paragraphe suivant, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance. Dans cette démarche, le ratio C/E (dosage en ciment sur dosage en eau) est calculé à partir de la formule :

$$Rb_{28} = G R_c (C/E - 0,5)$$

Rb_{28} ; résistance à la compression du béton à 28 jours,

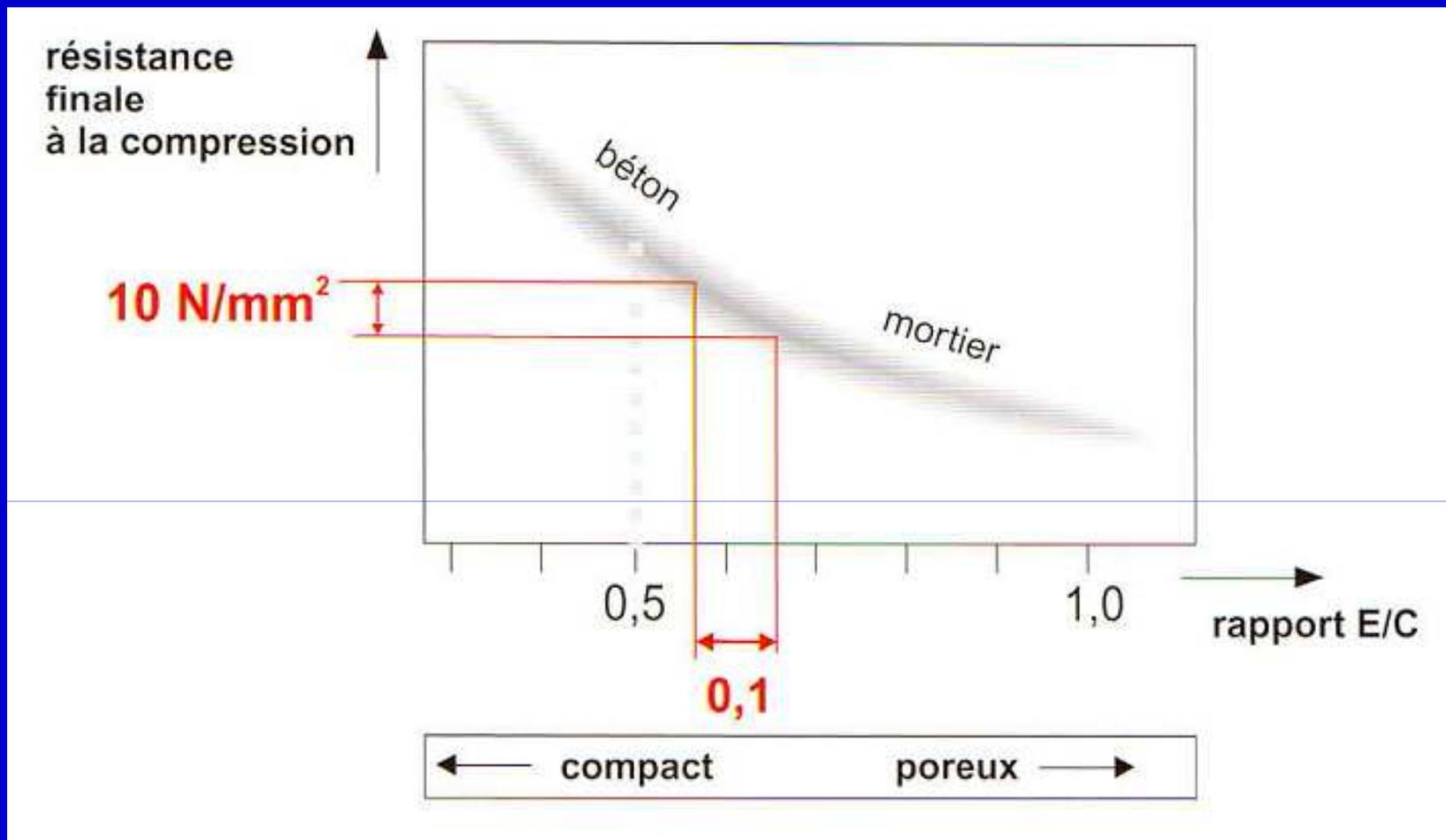
R_c = résistance réelle du ciment;

G : coefficient compris entre 0,35 et 0,65.

Dosage en eau

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On ressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

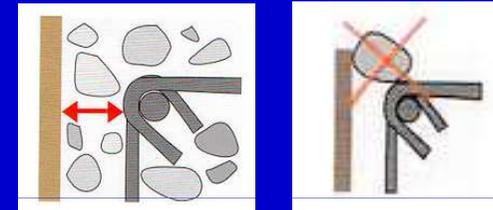
Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0.55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.



rapport E/C  "le plus bas possible !"

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats compatible avec les exigences géométriques précédemment déterminées de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler), on doit résoudre les deux problèmes suivants :

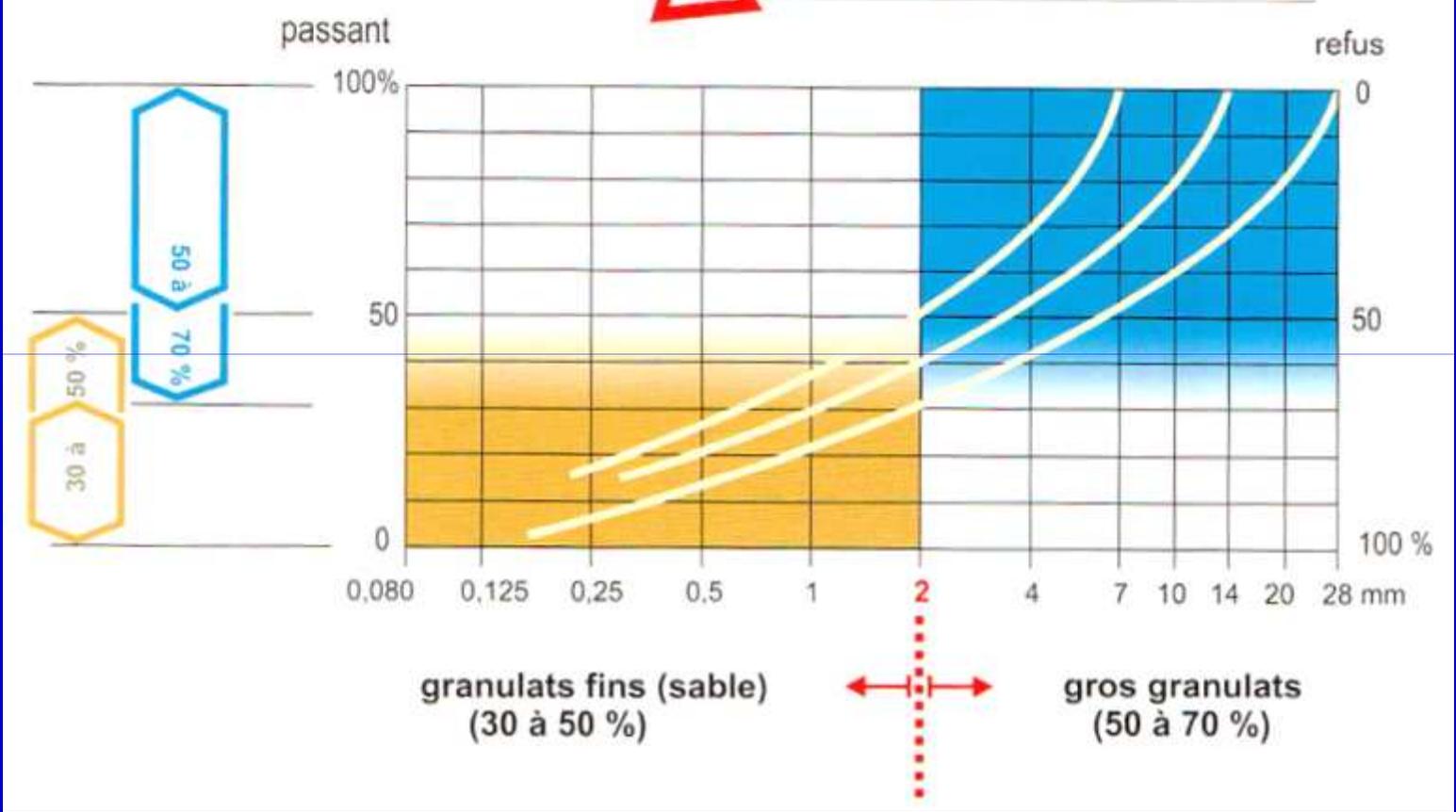
i., Choix des classes granulaires



La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/5 et un gravillon 5/16 ; 5/25 ou 5/40, par exemple. On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes.



“continue et étalée !”

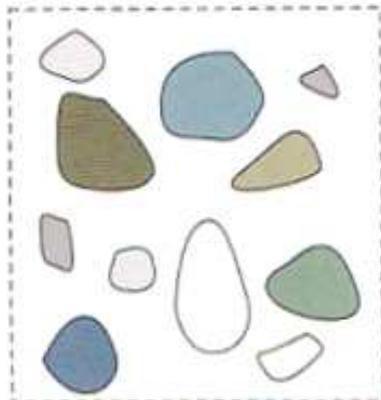


ii., Choix des granulats

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

- la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2 ;
- la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

résistance mécanique
durabilité



+



gros granulats

mortier

gravier / concassé

sable

ciment

eau

(adjuvants)

(additions)

RAPPORT SABLE / CIMENT

RAPPORT EAU / FINES

GRANULOMETRIE

RAPPORT EAU / CIMENT

Dosage en adjuvant

Selon la propriété recherchée pour le béton, on aura recours à l'adjuvant approprié : accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air, etc.). Compte tenu de la diversité des produits disponibles, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur compatibilité avec le ciment.

1- Méthode des Abaques de Dreux :

Les abaques de Dreux, permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois déterminée cette composition, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués.

Données retenues

En général, les données suivantes sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux.

i., La résistance à la compression du béton

Le domaine d'application des abaques est celui des bétons courants présentant une résistance à 28 jours, comprise entre 15 MPa et 40 MPa.

ii., La maniabilité du béton

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par l'essai au cône d'Abrams.

Granulats choisis

Pour l'établissement des abaques, trois classes granulaires ont été retenues :

- un sable 0/5 ;
- Trois graviers 5/16, 5/25 et 5/40.

Le ciment choisi est de classe 42,5 selon les hypothèses de la théorie de Dreux.

Considérations pratiques

Compte tenu des conditions de chantier les plus courantes, certaines hypothèses pratiques ont été retenues. Les quantités de granulats sont exprimées en volume, ce qui est suffisant pour la plupart des bétons courants.

Pour tenir compte de l'apport d'eau dû au degré d'humidité des granulats, les abaques introduisent un correctif défini dans le tableau suivant :

Degrés d'humidité des granulats					
		Sec	Humide	Mouillé	Trempé
Aspect		Mat Un peu poussiéreux	Brillant Légère adhérence sur la main	Très humide Dépôt d'eau sur la main	L'eau ruisselle sur les granulats qui sont saturés
% d'eau	Sables	0 à 3 %	4 à 7 %	8 à 11 %	12 à 15 %
	Gravillons	1 %	3 %	5 %	6 %

Les abaques donnent une indication sur la réduction d'eau procurée par l'emploi d'un adjuvant de type plastifiant réducteur d'eau, mais il est évident que la valeur réelle de réduction d'eau sera à déterminer selon l'adjuvant utilisé et son dosage.

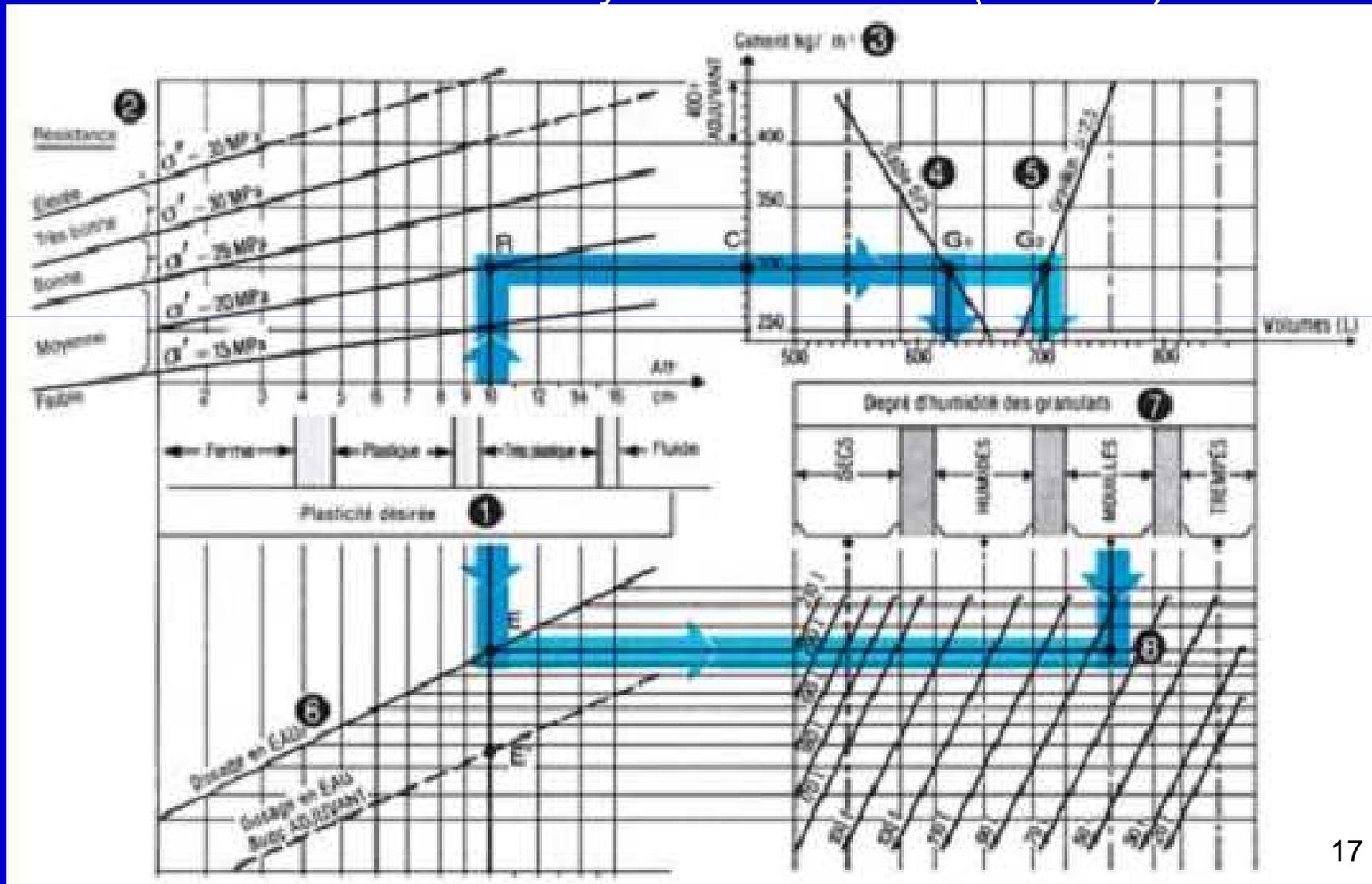
Utilisation des abaques



CAS D'UN BÉTON FIN = 12.5 mm, (Abaque n°1).

On désire :

1. un béton très plastique (affaissement 10 cm)
2. une résistance moyenne : 20 MPa (environ)



3. ciment (classe 42,5) 300 kg/m²
4. sable 0/5 mm à l'état sec 625 litres
5. Gravillons 5/12,5 mm 705 litres
6. dosage en eau – point E
7. on suppose que les granulats sont « mouillés »
8. la lecture sur la grille donne 80 litres d'eau environ à ajouter.

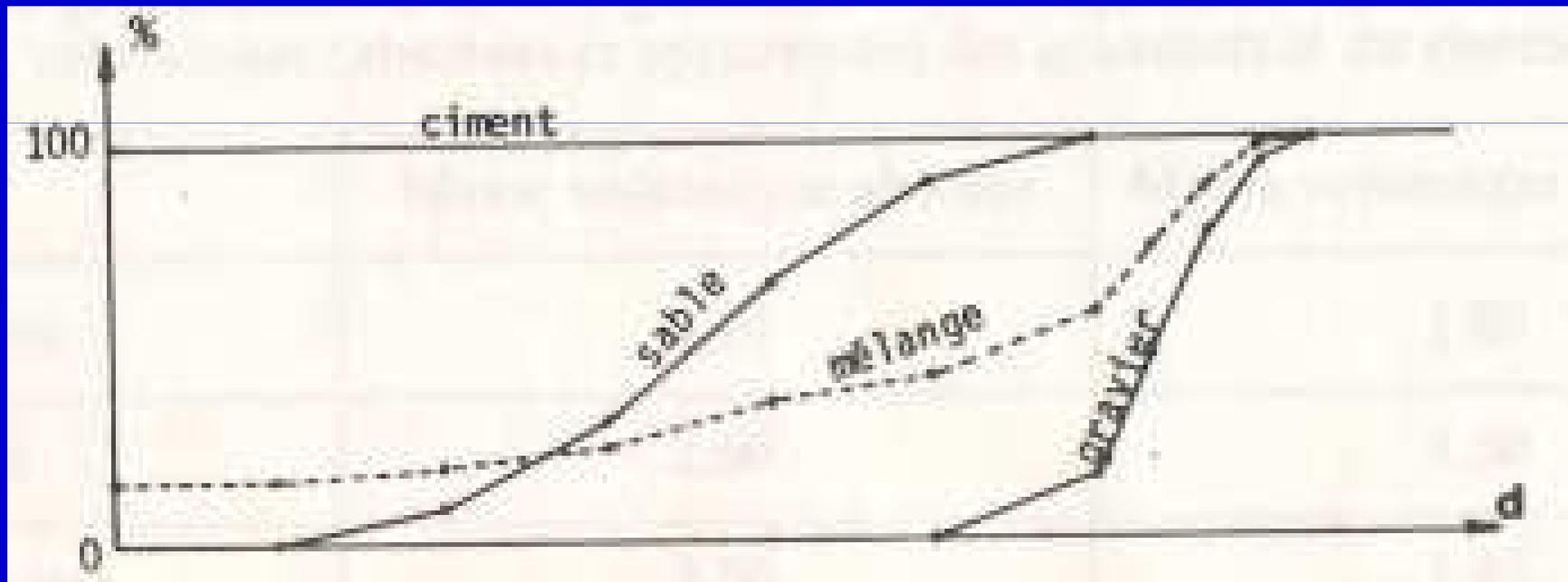
2. Méthode de Bolomey :

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/m³ ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

Considération expérimentale : on se réfère dans ce cas aux courbes granulométriques des constituants secs. Un mélange quelconque de ces constituants à des proportions définies a lui aussi une courbe granulométrique. En fonction des quantités des constituants secs à mettre en œuvre on a une infinité de mélanges donc une infinité de courbes granulométriques. Le problème est de trouver qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter ; cette courbe sera dite " courbe optimale ".

Le *principe de la méthode* consiste à :

- déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs,
- calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale,
- déduire la composition d'un mètre cube de béton.



Courbe optimale :

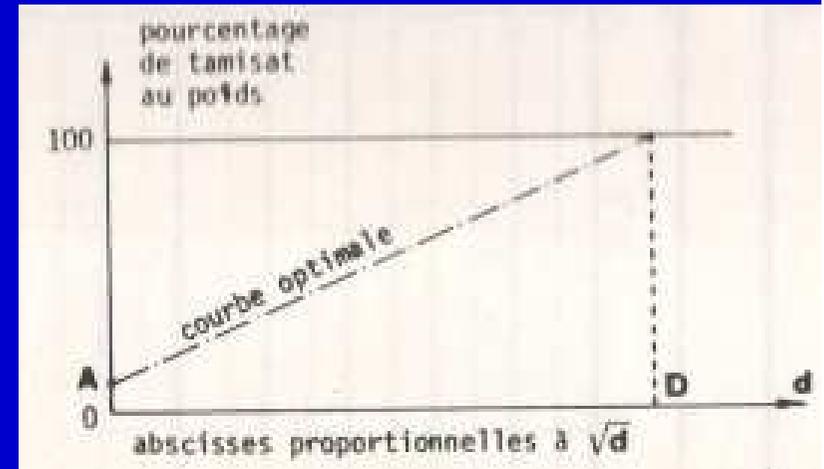
l'équation qui régie cette courbe est exprimé par la relation :

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

A et D sont des constantes.

L'équation est sous la forme d'une droite : $y = a + b \cdot x$ qui passe par les points : $d = 0$ et $P = 0$; $d = D$ et $P = 100$.

A : représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats.



Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6 ÷ 8	8 ÷ 10
Béton armé	10	12 ÷ 14
Béton coulé	12	14 ÷ 16

Calcul du pourcentage des constituants :

Cas du ciment :

$$c (\%) = \frac{\text{masse du ciment}}{\text{masse totale des éléments secs}} \times 100$$

Cas des granulats :

une méthode graphique nommée la “Méthode de Joisel” est appliquée. Cette dernière est universelle, applicable à tous granulats ; toutes les courbes optimales et tous modes de graduation des axes.

Si on considère le cas le plus simple, mélange de deux granulats (d_1/d_2) ; (d_3/d_4) ; ces courbes tracées : 3 cas seulement sont possibles :

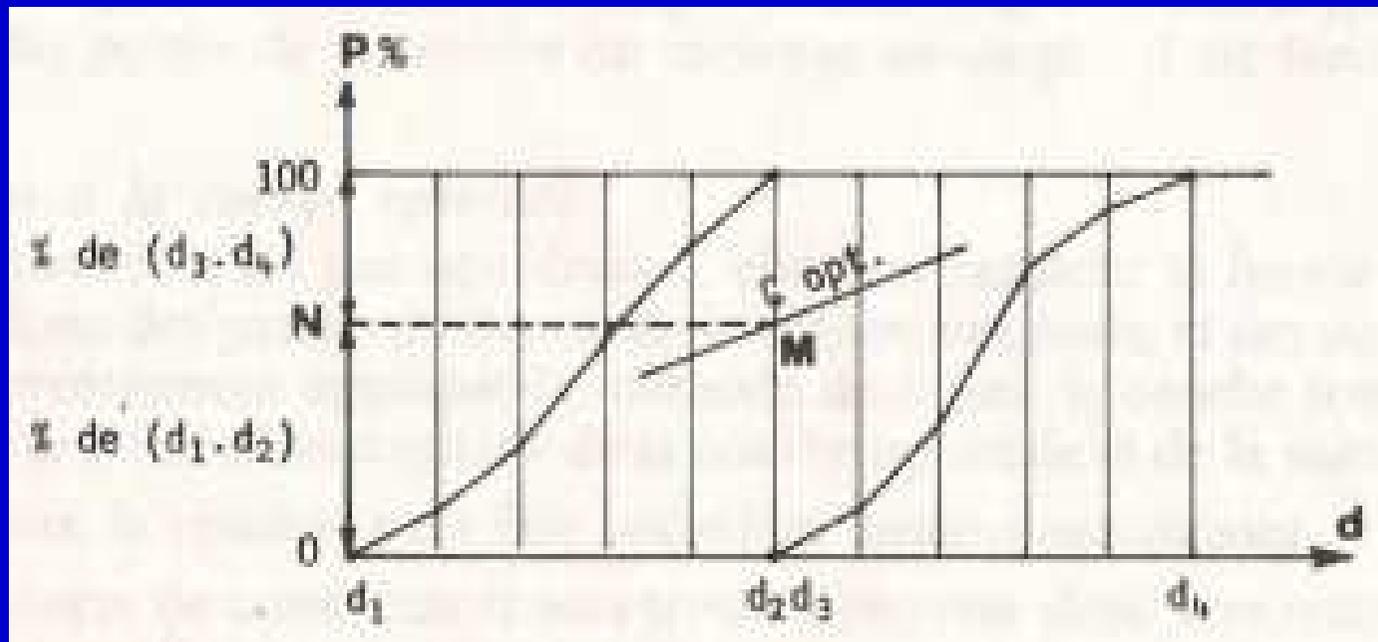
- d_3 coïncide avec d_2 : juxtaposition des deux granulats,
- d_3 à gauche de d_2 : superposition partielle,
- d_3 à droite de d_2 : discontinuité des deux granulats.

Comment faire ?

La méthode de Joisel repose sur le tracé d'une parallèle à l'axe des ordonnées, prenons successivement les trois cas :

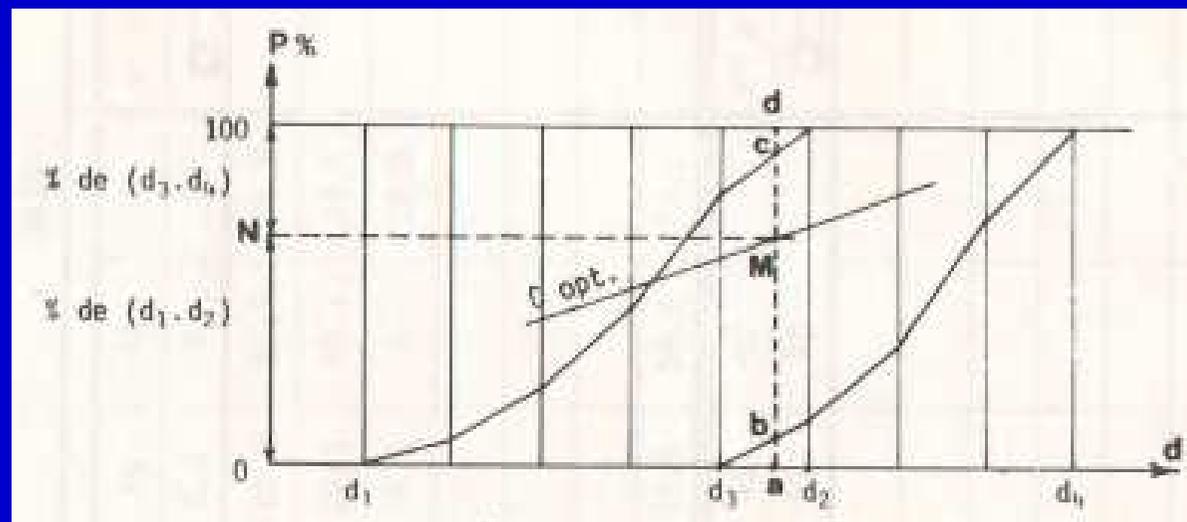
1- Juxtaposition des deux courbes : la verticale ici est l'ordonnée correspondant à d_2d_3 . Cette verticale coupe la courbe optimale en un point M qui reporté en N sur l'échelle des ordonnées détermine deux segments :

- \overline{ON} : % du granulat d_1d_2 , ou % des composants de dimension $< d_2$
- $\overline{N100}$: % du granulat d_3d_4 , ou % de tout ce qui est $> d_2$



2- Superposition partielle des deux courbes : La verticale est placée à l'abscisse " d_0 " telle que pour cette dimension de tamis, le % du tamisat du gros élément soit égale au % de refus du plus petit ($ab = cd$). M et N ont la même signification que précédemment.

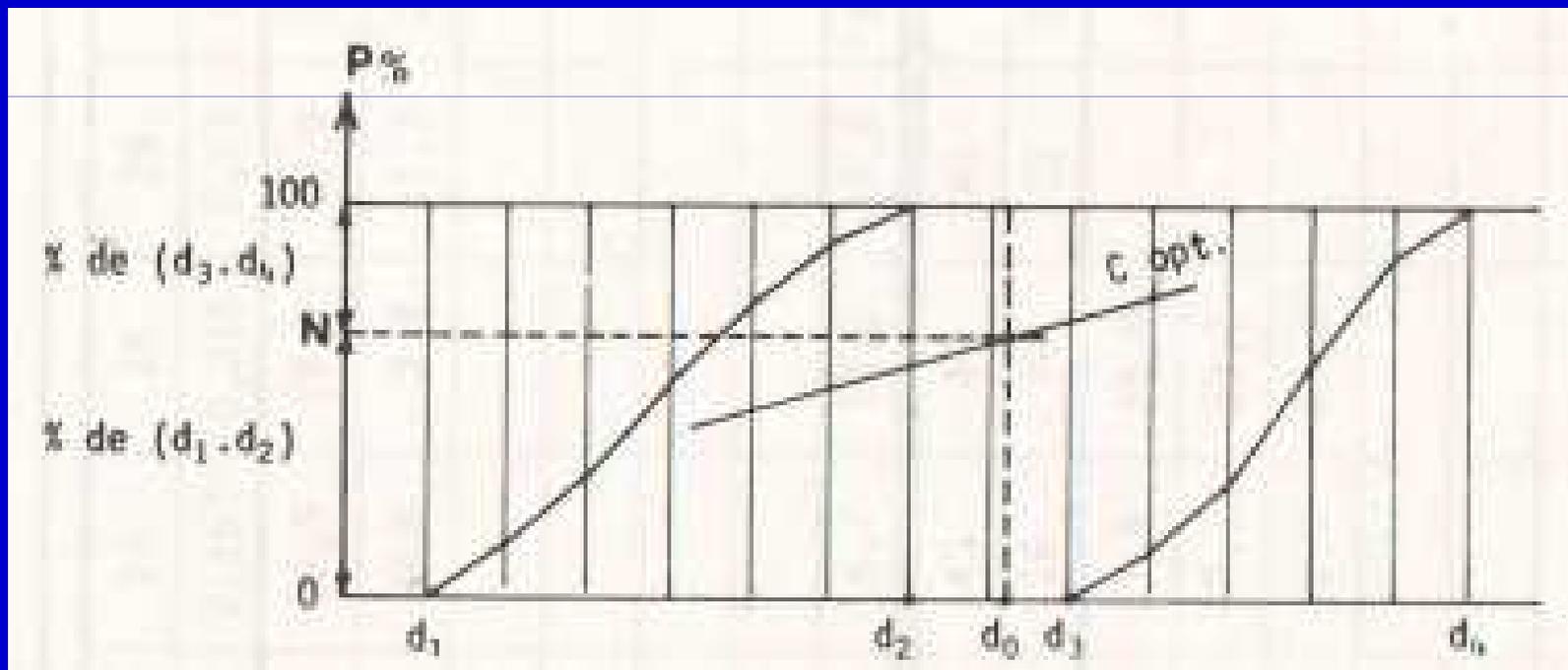
Il est important de placer avec précision la verticale " d_0 " car l'ordonnée du point d'intersection de la courbe optimale et de cette verticale dépend de son abscisse. Le procédé consiste de déplacer une règle jusqu'à ce que les deux segments apparaissent égaux. Manque de rigueur ; il est préférable de recourir à une construction graphique. Le principe consiste à faire rabattre le demi-plan inférieur sur le demi-plan supérieur autour de l'horizontale xx' (50 %). Les segments se coupent précisément au point recherché surtout si l'angle est grand.



3- Discontinuité entre les 2 courbes : la verticale est au point d'abscisse :

$$d_0 = \frac{d_2 + d_3}{2}$$

et la construction est la même que précédemment.

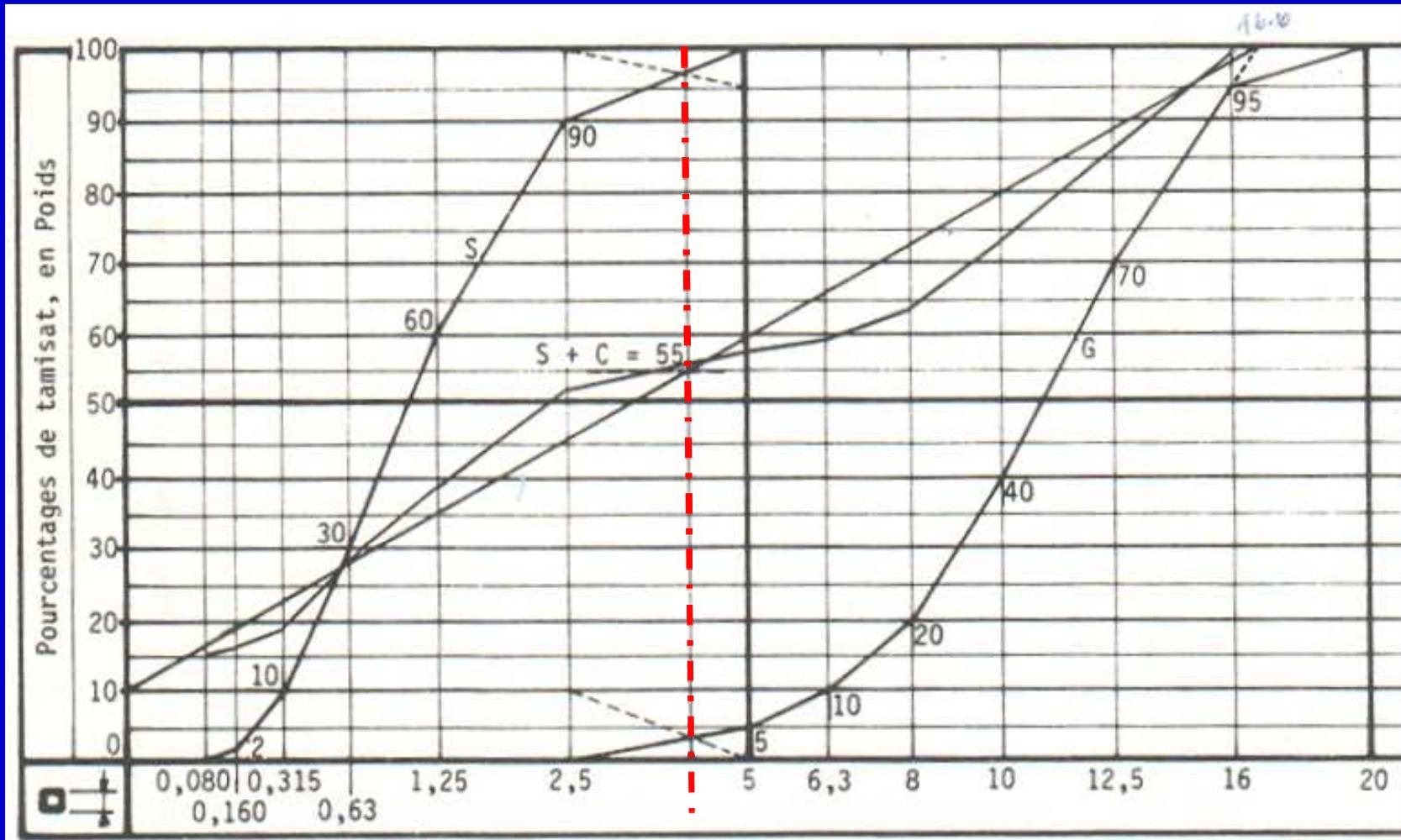


Détermination de la courbe du mélange :

Les pourcentages seront déterminés par le calcul sans qu'une nouvelle analyse granulométrique ne soit nécessaire. Le pourcentage du ciment passe à travers tout les tamis. Le pourcentage des tamisats des granulats est calculé pour chaque tamis sur la base des pourcentages de tamisat de chaque granulat et du pourcentage du granulat dans le mélange. Le pourcentage des tamisats du mélange est le cumul de tous ces tamisats calculés à part pour chaque granulat.

Constituants	%	20	23	26	29	32	35	38	39	40	41
		0,080	0,160	0,315	0,63	1,25	2,5	5,0	6,3	8	10
Ciment	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
Sable	39,1		0,8	3,9	11,7	23,4	35,2	39,1	39,1	39,1	39,1
Gravillon	45,0							2,2	4,5	9	18,0
Totaux	100,0	15,9	16,7	19,8	27,6	39,3	51,1	57,2	59,5	64,0	73,0

Constituants	%	42	43	44	45	46	47	48	49	50
		12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Ciment	15,9	15,9	15,9	15,9						
Sable	39,1	39,1	39,1	39,1						
Gravillon	45,0	31,5	42,7	45,0						
Totaux	100,0	86,5	97,7	100,0						



Si nous avons correctement appliqué la méthode de Joisel, la courbe trouvée doit passer sensiblement par le point d'intersection de la courbe optimale et la verticale de Joisel.

On ne s'est préoccupé jusqu'à présent que des éléments secs ; mais le béton contient aussi de l'eau. Il nous faut alors déterminer cette quantité.

Il n'existe pas de méthode rigoureuse pour cette détermination ; il est donc nécessaire de faire un calcul en fonction de relation empirique :

- petit constituants ($D < 0,16$ mm) :

$$E_1 = 0,23 \times \text{poids des éléments secs} < 0.16$$

- gros éléments ($D \geq 0,16$ mm) :

$$E_2 = \frac{k \cdot \text{poids des éléments secs} \geq 0,16}{1,17 \cdot \sqrt[3]{0,16 \cdot D'}}$$

S'il s'agit de passoire au lieu de tamis le coefficient 1,17 serait remplacé par 1.

Le coefficient k est tiré du tableau qui suit :

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	0,08	0,095
Béton vibré	0,09 ÷ 0,095	0,1 ÷ 0,11
Béton coulé	0,1 ÷ 0,11	0,12 ÷ 0,13

La quantité de l'eau doit être exprimée en % comme pour le ciment et les granulats, par rapport au total des éléments secs.

$$E (\%) = \frac{E_1 + E_2}{\text{masse des éléments secs}} \cdot 100$$

Le rapport E/C est important dans la composition du béton ; cette constante doit se rapprocher le plus de 0,5. Cette quantité d'eau calculée n'est qu'une estimation.

La gâchée d'essai, fournie une valeur plus précise.

Il s'agit d'introduire dans une bétonnière des quantités de constituants secs proportionnelles à ceux calculées, après leur mélange à sec, on ajoute l'eau progressivement jusqu'à ce que la consistance voulue soit obtenue.

La quantité d'eau qui y correspond est multipliée par le facteur de réduction pour déterminer la quantité réelle d'eau de gâchage pour 1 m³ de béton.

L'expérience montre que si la valeur absolue de la différence entre la quantité réelle et la quantité calculée est inférieure ou égale à 5 kg/m³, les résultats trouvés sont conservés sans modification. Dans le cas contraire, on refait les calculs avec la valeur trouvée par l'essai de gâchage.

$$E (\%) = \frac{\text{quantité réelle d'eau de gâchage}}{\text{masse des éléments secs}} \cdot 100$$

Le calcul du poids des éléments secs s'effectue en supposant connu la densité apparente du béton.

La masse des éléments secs = masse totale - masse de l'eau de gâchage,

La masse des granulats = masse des éléments secs - masse du ciment,

La masse de chaque granulat = % calculé \times masse des granulats.

Cette méthode donne des bétons riches en éléments fins, donc maniable, susceptible de rester bruts de décoffrage. On l'emploiera lorsque ces quantités sont recherchées, la résistance mécanique devant simplement être bonne. Son emploi est fréquent pour les travaux routiers et pour les bétons devant être mis en place par pompage.

PROCESSUS D'ÉTUDE, SUR UN EXEMPLE

Données.

(Ces données correspondent toujours à des granulats *secs*.)

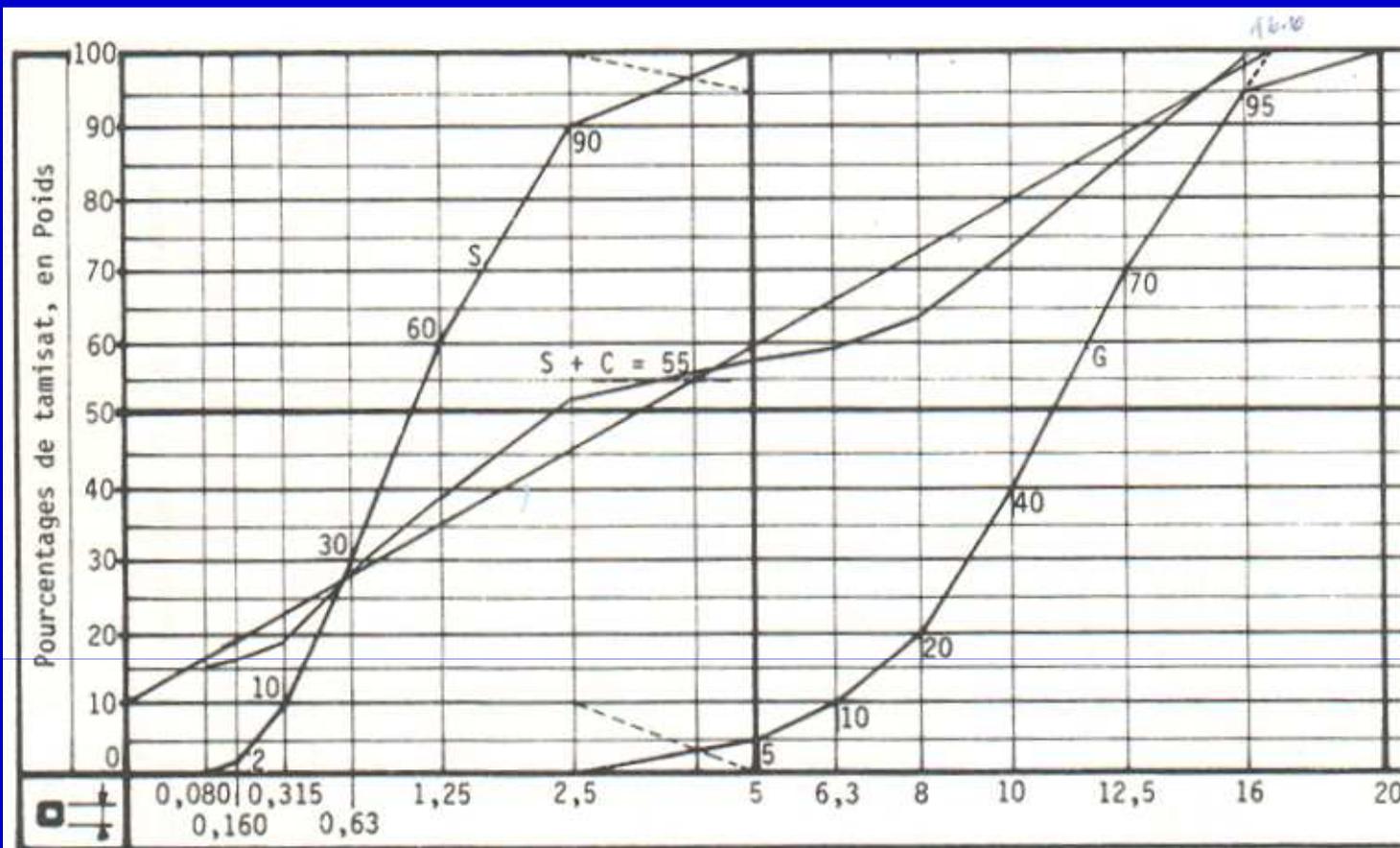
- Courbes granulométriques des granulats : voir figure
- Masses volumiques (absolues et apparentes) des granulats et du ciment :

	Masse volumique absolue	Masse volumique apparente
Ciment	3,10	1,00
Sable	2,60	1,50
Gravier	2,50	1,45

- Provenance des granulats : roulés.
- Nature du béton cherché : béton pour béton armé, normalement ferrailé, pour ossature de bâtiment.
- Dosage en ciment : 350 kg/m³ de béton en œuvre.

Déterminer la courbe optimale.

- Le tableau des valeurs de A donne : $A = 10$.
- Détermination de D :
- D'où la courbe, figure



Pour 1 m³ de béton :

- Masse du ciment : c'est le dosage, 350 kg.
- Masse du total des éléments secs : elle ne peut être déterminée a priori. Il faut donc faire une hypothèse : en fin d'étude, les corrections utiles seront faites.

L'expérience montre que, pour 1 m³ de béton, la masse totale des éléments secs est de l'ordre de 2 200 kg. Nous établirons les calculs sur cette base :

$$C\% = \frac{\text{Dosage}}{2\,200} \times 100 \quad (\text{hypothèse}).$$

Dans notre exemple : $C = 15,9$.

Comme on a déjà
on en déduit :

$$\begin{array}{l} S + C = 55\% \\ C = 15,9 \\ \hline S = 39,1\% \end{array} \quad \text{et} \quad G = 45\%.$$

2. Qu'un praticien expérimenté peut évaluer directement la quantité d'eau nécessaire, qu'une détermination expérimentale est aléatoire, et que le calcul peut donner un ordre de grandeur acceptable.

Faisons donc ce *calcul* (voir § 11.1.3.3).

1^o $D < 0,16$ mm

• Ciment	350 kg	
• Sable fin : la figure 54 indique (ligne « sable », colonne 0,16) qu'il y en a 0,8 % de 2 200	18 kg	
	<hr/>	
Total à mouiller	368 kg	
	× 0,23	85 kg

2^o $D \geq 0,16$ mm

• $k = 0,09$, $d_1 = 0,16$ mm, $d_2 = 16,6$ mm environ		
• Poids total des éléments secs	2 200 kg	
Dont inférieurs à 0,16 (calcul ci-dessus)	368 kg	
	<hr/>	
Reste supérieurs ou égaux à 0,16 mm	1 832 kg	
• Donc : Eau = $\frac{0,09 \times 1\,832}{1,17 \cdot \sqrt[3]{0,16 \times 16,6}}$ =		102 kg

3^o Soit au total

pour 1 m³ de béton, valeur que nous retenons comme hypothèse de calcul.

12.1.3.5.2. *Pourcentage d'eau.*

Il faut que la quantité d'eau soit exprimée, comme pour le ciment et les granulats, en pourcentage par rapport au total des éléments secs.

• Nous pourrions calculer comme pour le ciment :

$$E = \frac{187}{2\,200} \times 100 = 8,5 \%$$

Composants	Composants en Poids	m.v. absolues	Composants en Vol.abs.	m.v. du béton	Poids en %	Composition en Poids	m.v. app.	Composition en Vol. app.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	2/4	2/2	5 x 6		7/8
C	15,9	3,10	5,13	$\frac{108,5}{46,67} = 2,325 \text{ T/m}^3$	14,7	(350) 342	1,0	350
S	39,1	2,60	15,04		36,0	837	1,5	558
G	45,0	2,50	18,00		41,5	965	1,45	666
E	8,5	1,0	8,50		7,8	181	1,00	181
Totaux:	108,5		46,67		100,0	2325		

Gâchée d'essai.

But : Déterminer la quantité réelle d'eau de gâchage.

Processus :

● Introduire dans la bétonnière des quantités de *constituants secs* proportionnelles à ce que nous venons de calculer ; par exemple :

Ciment : 1/20 de 350 kg = 17,5 kg
 Sable : 1/20 de 837 kg = 41,85 kg
 Gravillon : 1/20 de 965 kg = 48,25 kg

- Mettre la bétonnière en route, et, après mélange à sec, ajouter progressivement de l'eau, jusqu'à ce que la *consistance voulue* soit obtenue. Si nous avons préalablement pesé 15,000 kg d'eau, et que, après mouillage du béton, il en était resté 5,350 kg il aurait fallu, pour 1/20 de m³ de béton, utiliser 9,650 kg d'eau.

- Il faut donc, pour 1 m³ de béton :

$$9,650 \times 20 = 193 \text{ kg d'eau ,}$$

alors que nous avons envisagé 187 kg seulement. L'erreur est donc de 6 kg d'eau par mètre cube de béton.

Reprise des calculs

Les pourcentages de ciment et d'eau deviennent, respectivement

$$C = \frac{350}{2\,152} = 16,3 \%, \quad E = \frac{193}{2\,152} = 9,0 \%$$

Et le calcul (définitif) est celui du tableau

Composants	Composants en Poids	n.v. absolues	Composants en Vol. abs.	n.v. du béton	Poids en %	Composition en Poids	n.v. app.	Composition en Vol. app.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			2/3	$\sqrt[2]{\sqrt[4]{}}$	2/2	5 x 6		7/8
C	16,3	3,1	5,27	$\frac{109,0}{47,15} = 2,312$	14,95	(350) 346	1,0	350
S	38,7	2,6	14,88		35,50	821	1,5	547
G	45,0	2,5	18,00		41,28	954	1,45	658
E	9,0	1,0	9,00		8,26	(193) 191	1,0	193
Totaux	109,0		47,15		100,00	2 312		

Le chantier recevra le tableau suivant :

	Quantités pour 1 m ³ de béton	
	en masse	en volume apparent
Ciment	350 kg	350 dm ³
Sable sec	821 kg	547 dm ³
Gravillon sec	954 kg	658 dm ³
Eau (sur éléments secs)	193 kg	193 dm ³
Total	2 318 kg	

3. 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.

Particularités de la méthode :

1. Applicables à tous les granulats, quelle qu'en soit la masse volumique
2. Faury a étudié l'effet des vides, vides qui varient avec $\sqrt[5]{D}$
3. Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de Paroi et du Rayon moyen du moule

$$E_p = \frac{D}{R}$$

$$R = \frac{\text{Vol du béton (aciens déduits)}}{\text{surf de tout ce qui est en contact du béton (coffrage + aciens)}}$$

Il faut vérifier que :

Nature des granulats	Diamètre maximum $D \leq$			
Granulats concassés	0,8 e	0,7 c	1,6 r	R
Granulats roulés	0,9 e	0,8 c	1,8 r	1,2 R

e : espacement horizontal entre les armatures horizontales,

c : enrobage moyen des armatures,

r : rayon moyen d'une maille d'armatures,

$$r = \frac{e \times b}{2 \cdot (e + b)}$$

b : espacement vertical entre les armatures longitudinales.

Courbe optimale :

Ce n'est plus un segment de droite ; mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut définir : l'origine, l'extrémité et le point de brisure.

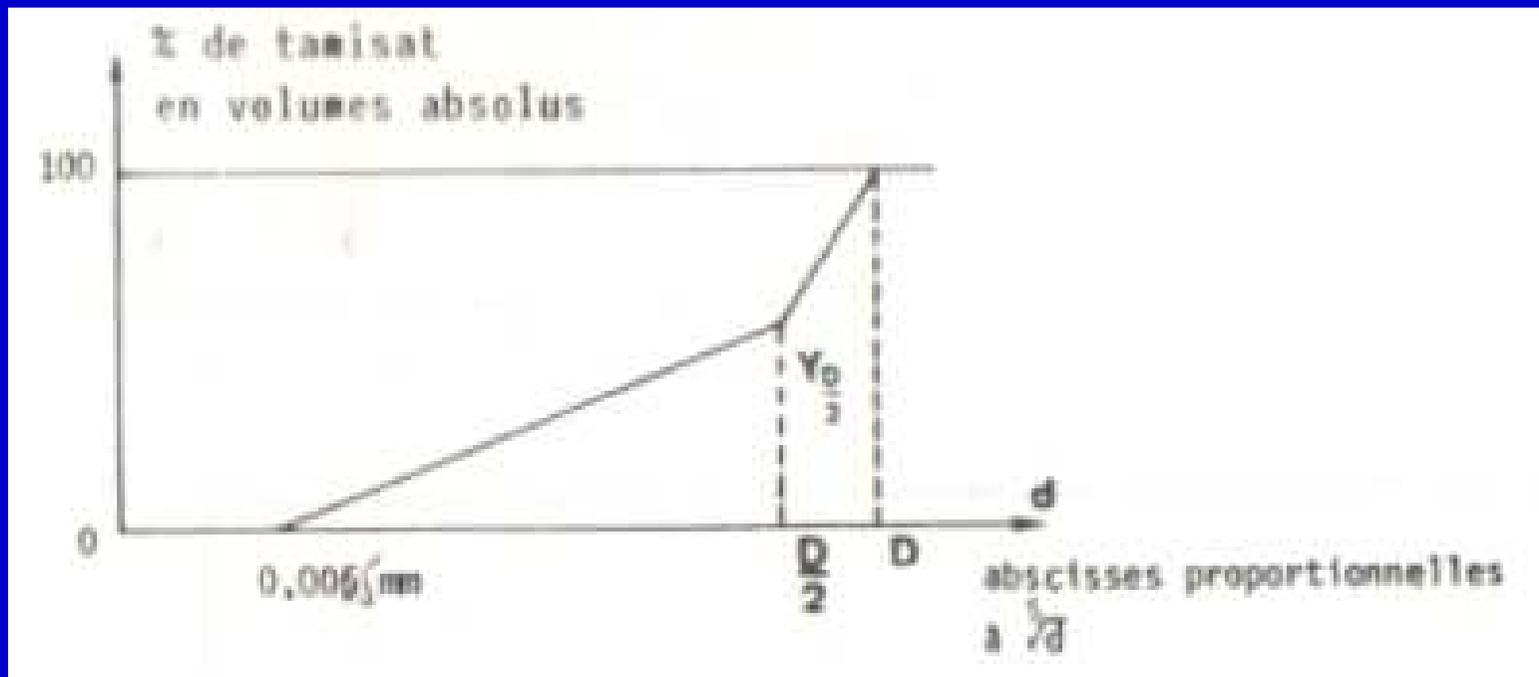
- origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0065 mm. On représente sur l'axe des abscisses les dimensions des tamis (rapport.) et sur l'axe des ordonnées le % des tamisats cumulés en volume absolu.
- extrémité : point d'abscisse D et d'ordonnée 100.
- point de brisure : abscisse D/2;

- point de brisure : abscisse $D/2$; ordonnée $y_{D/2}$ donnée par la formule :

$$y_{D/2} = A + 17,8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{(R/1,25 \cdot D) - 0,75}$$

Si au lieu des tamis, on utilise des passoires le point de brisure est exprimé par :

$$y_{D/2} = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{R/D - 0,75}$$



A : constante traduisant la maniabilité du béton (voir tableau qui suit),

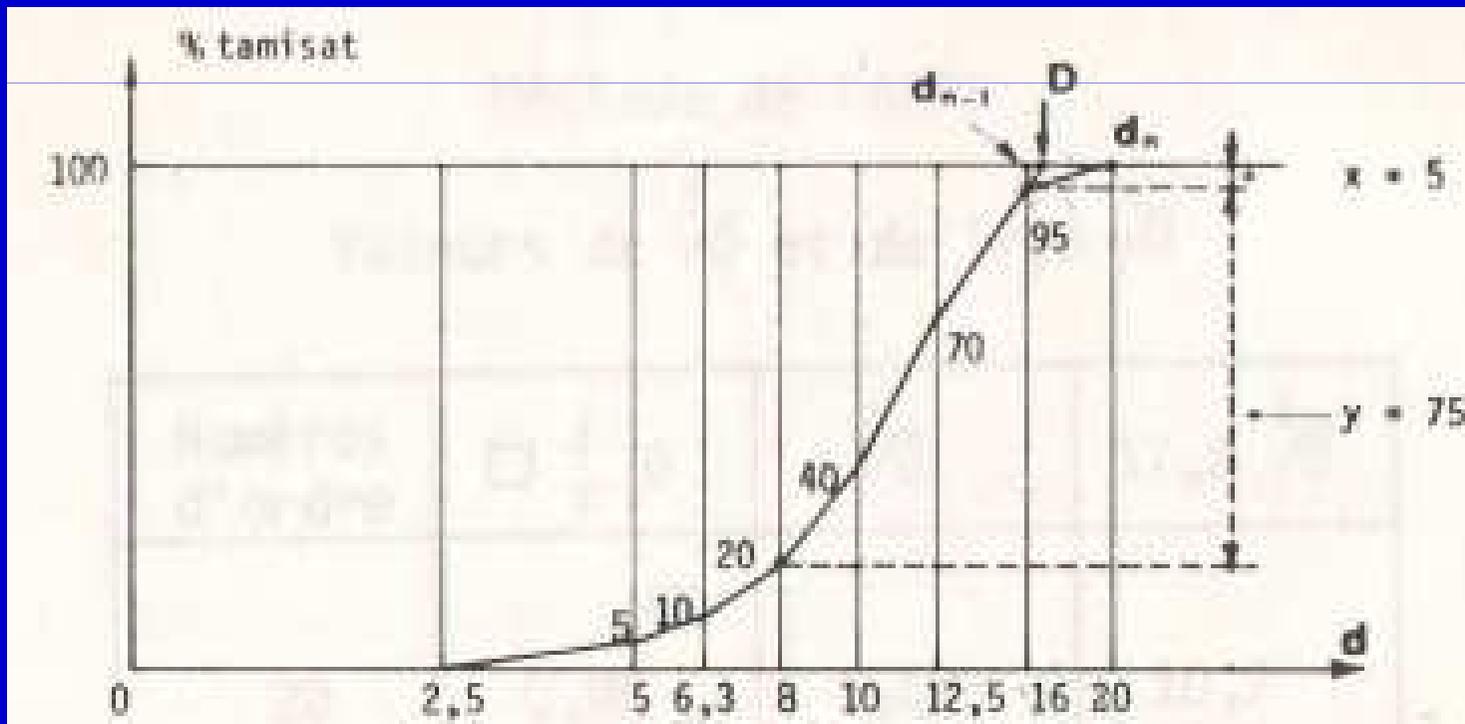
B : constante traduisant l'importance du serrage du béton :
lorsque le serrage est particulièrement énergétique $B = 1$ et,
 $B = 1,5$ dans tous les autres cas.

0	D \geq 25 mm : béton armé courant pour bâtiments et ouvrages d'arts.			
	Consistance du béton	Sable roulé		Sable concassé
		gravier roulé	gravier concassé	
	assez plastique	24 \div 26	26 \div 28	30 \div 32
	plastique	26 \div 28	28 \div 30	32 \div 34
25	25 < D \leq 50 : béton légèrement armé		A = 15 \div 20	
	50 < D \leq 80 : granulats roulés		A = 15 \div 20	
	D > 80 : granulats roulés		A = 12	
80	béton de pistes		A = 15	

Calcul de D :

C'est la dimension du tamis qui laisserait tout juste passer la totalité du granulat. Considérons la courbe du plus gros granulat du béton que nous allons étudier. La valeur de D est un peu supérieure à d_{n-1} ; c'est-à-dire :

$$D = d_{n-1} \left(\frac{x}{2y} \right)$$



Calcul de l'indice des vides et de la quantité d'eau de gâchage :

Pour un béton d'une consistance donnée avec des matériaux donnés, il y a un volume maximal de matières solides auquel correspond un vide minimal ; celui-ci est donné par :

$$n = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Les valeurs usuelles de K et K' sont données par le tableau suivant :

Consistance du béton	Moyen de mise en œuvre	Matériaux utilisés			K'
		Sable roulé gravier roulé	Sable roulé g. concassé	s. concassé g. concassé	
molle	piquage et damage sans vibration	> 0,34	> 0,36	> 0,38	0,004
normale	vibration moyenne	0,26	0,28 0,30	0,30 0,34	0,003
ferme	vibration poussée	0,25 0,27	0,26 0,28	0,28 0,30	0,002
très ferme	vibration puissante	< 0,24	< 0,25	< 0,27	0,002

La quantité d'eau E devrait remplir les vides est en pratique insuffisante pour une mise en œuvre commode, il faut donc rajouter de 20 ÷ 30 % d'eau supplémentaire en fonction de l'ouvrabilité désirée :

$$1,2 \cdot n \leq E \leq 1,3 \cdot n$$

B Ferme B. Mou

Composition pondérale des constituants solides :

Dans 1 m³ de béton, on a un volume absolu total de constituants solides égal à 1-E,

nous avons donc : $V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} = 1 - E$

le volume absolu du ciment : $V_{\text{ciment}} = \text{dosage en ciment} / M_v$
absolue du ciment.

$$C (\%) = \frac{V_{\text{ciment}}}{1000 - E}$$

Les volumes de sable, ciment et gravier sont déterminés à partir de la courbe granulométrique et la méthode de Joisel.

La procédure qui suit est similaire à celle de Bolomey :

- composition granulométrique du mélange,
- composition d'un mètre cube de béton.

PROCESSUS D'ÉTUDE SUR UN EXEMPLE.

Données.

(On se reportera utilement au paragraphe correspondant de la méthode de Bolomey : nous reprendrons la plupart des données de cette étude, pour que les résultats soient comparables.)

- Sable et gravier roulés
- On veut faire un béton armé courant :
 - mis en place par piquage,
 - dosé à 350 kg de ciment par mètre cube de béton en œuvre.
- Le ferrailage de la partie la plus complexe
- Les masses volumiques sont celles adoptées pour l'étude Bolomey

Exemple : Pour la pièce de la figure , le calcul (fait pour une longueur de 1 m) donne :

Volume total aciers + béton :	67 500 cm ³
dont aciers :	5 731
<hr/>	
Reste volume béton :	61 769 cm ³
Surface coffrage :	8 000 cm ²
— aciers :	17 090
<hr/>	
— totale :	25 090 cm ²

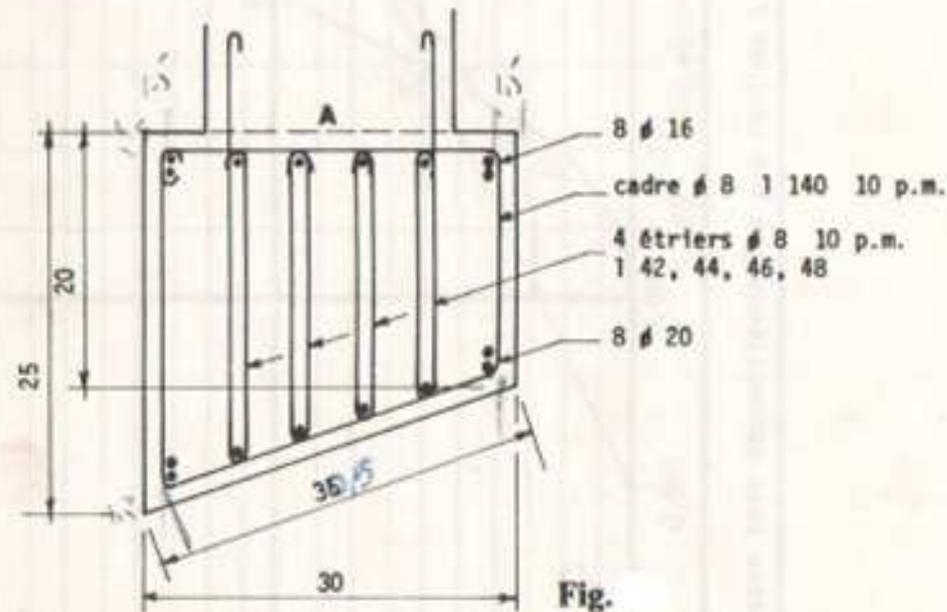
$$\text{D'où } R = \frac{61\,769}{25\,090} = 2,46 \text{ cm,}$$

soit 24,6 mm.

Si la plus grande dimension des granulats est $D = 16,5 \text{ mm}$, on a :

$$\frac{1,25 D}{R} = \frac{1,25 \times 16,5}{24,6} = 0,84 .$$

qui est bien compris entre 0,8 et 1.



Déterminer la courbe optimale.

1. *Origine* : Abscisse 0,005, sur l'axe des d .
2. *Extrémité* : Le gravillon est celui pris en exemple

- d'abscisse $D = 16,5$,
- d'ordonnée 100.

3. *Point de brisure* :

- Abscisse :

$$\frac{D}{2} = 8,25 .$$

- Ordonnée :

$$Y_{D/2} = A + 17,8 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{1,25 D} - 0,75} .$$

• Valeur de A : Le tableau, , donne : A compris entre 26 et 28. A défaut d'indications plus précises : $A = 27$.

- Valeur de $17,8 \sqrt[5]{D}$:

$$17,8 \sqrt[5]{D} = 31 .$$

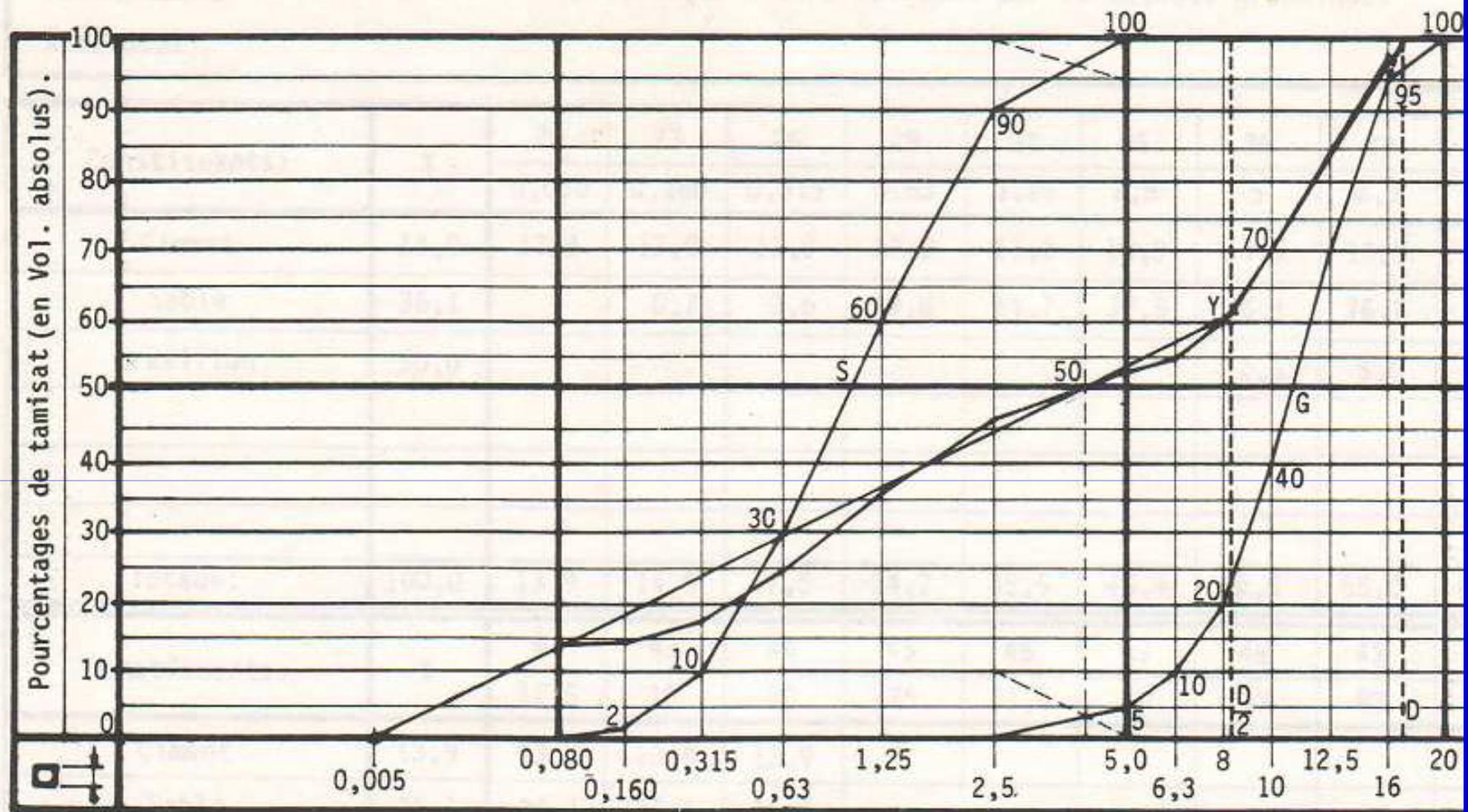
- Valeur de $\frac{B}{\frac{R}{1,25 D} - 0,75}$:

$$= \frac{1,5}{\frac{24,6}{1,25 \times 16,5} - 0,75} = 3,4 .$$

- Valeur de $Y_{D/2}$:

$$Y_{D/2} = 27 + 31 + 3,4 = 61,4 .$$

que nous arrondirons à l'entier le plus proche : $Y_{D/2} = 61$. D'où la courbe optimale,



Les abscisses sont proportionnelles aux racines cinquièmes des dimensions des tamis.

Pour 1 m³ de béton, par exemple :

- Volume absolu du ciment = $\frac{\text{masse de ciment (= le dosage)}}{\text{masse volumique absolue du ciment}}$
 $= \frac{350}{3,1} = 113 \text{ dm}^3.$

- Volume absolu des éléments secs = 1 000 dm³ – volume de l'eau.

Il nous faudra encore (voir 12.1.3.5.1, pour Bolomey) faire une hypothèse quant à la quantité d'eau. Prenons la même valeur : 187 kg. Alors :

$$\text{Volume éléments secs} = 1\,000 - 187 = 813 \text{ dm}^3.$$

D'où $C = \frac{113}{813} \times 100$, soit $C = 13,9\%$.

La construction (fig.) est la même que pour la méthode de Bolomey et donne :

Comme on a :

$$\begin{array}{r} S + C = 50 \\ C = 13,9 \\ \hline \end{array}$$

il vient :

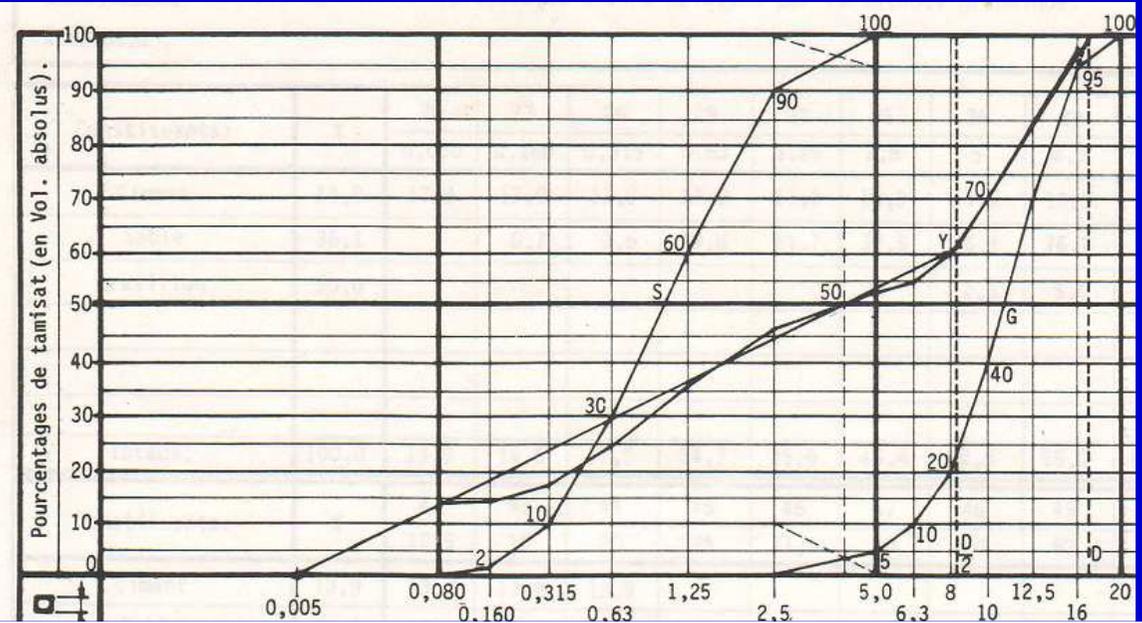
$$S = 36,1\% \quad \text{et} \quad G = 50\%.$$

Donc, *sauf erreur* de notre part, et si la méthode de Joisel est bien applicable à notre cas, un mélange composé de :

$C =$	13,9 % de ciment ,
$S =$	36,1 % de sable ,
$G =$	50,0 % de gravier .

Constituants:	%	20	23	26	29	32	35	38	39	40	41
		0,080	0,160	0,315	0,63	1,25	2,5	5	6,3	8	10
Ciment	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9	13,9
Sable	36,1		0,7	3,6	10,8	21,7	32,5	36,1	36,1	36,1	36,1
Gravillon	50,0							2,5	5,0	10,0	20,0
Totaux:	100,0	13,9	14,6	17,5	24,7	35,6	46,4	52,5	55,0	60,0	70,0

Constituants:	%	42	43	44	45	46	47	48	49	50
		12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Ciment	13,9	13,9	13,9	13,9						
Sable	36,1	36,1	36,1	36,1						
Gravillon	50,0	35,0	47,5	50,0						
Totaux:	100,0	85,0	97,5	100,0						



Calcul de la composition d'un mètre cube de béton.

Composants	t	$\frac{1000 - \text{eau}}{100}$	Volumes absolus	Masses volumiques absolues	Composition en masses	Masses volumiques apparentes	Composition en Vol. app.
1	2	3	4	5	6	7	8
			2×3		4×5		$6/7$
C	13,9	8,13	113	3,10	350	1,00	350
S	36,1	8,13	294	2,60	764	1,50	509
G	50,0	8,13	406	2,50	1 015	1,45	700
Eau			187	1,00	187	1,00	
Totaux	100,0		1 000		2 316		

Gâchée d'essai.

But et processus : Comme pour la méthode de Bolomey

Conséquences : Là encore, si l'erreur sur la quantité d'eau est supérieure à 5 l/m³ de béton, il faudra reprendre les calculs.

Reprise des calculs

Supposons que la quantité réelle d'eau de gâchage soit 193 dm³. (On a bien : 193 - 187 = 6 > 5.)

- Le volume absolu des éléments secs est :

$$1\,000 - 193 = 807 \text{ dm}^3,$$

et le pourcentage de ciment :

$$C = \frac{113}{807} \times 100 = 14,0 \%$$

Puisque $S + C = 50 \%$:

$$S = 50,0 - 14,0 = 36 \%$$

Et G ne change pas.

Calcul de la composition d'un mètre cube de béton.

Composants	%	$\frac{1\ 000 - \text{eau}}{100}$	Volumes absolus	Masses volumiques absolues	Composition en Masses	Masses volumiques apparentes	Composition en Vol. app.
1	2	3	4	5	6	7	8
			2 x 3		4 x 5		6/7
C	14,0	8,07	113	3,10	350	1,00	350
S	36,0	8,07	290	2,60	754	1,50	503
G	50,0	8,07	404	2,50	1 010	1,45	697
Eau			193	1,00	193	1,00	193
Totaux	100,0		1 000		2 307		

Le chantier recevra le tableau suivant :

	Quantités pour 1 m ³ de béton	
	en masse	en volume apparent
Ciment	350 kg	350 dm ³
Sable sec	754 kg	503 dm ³
Gravillon sec	1 010 kg	697 dm ³
Eau (sur éléments secs)	193 kg	193 dm ³
Total	2 307 kg	