

Composition des bétons

par **Georges DREUX**

Ingénieur en Chef au Centre Expérimental de Recherches
et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP)

1. Critères en fonction de la destination des bétons	C 2 220 - 3
1.1 Dimension maximale D des granulats	— 3
1.2 Résistance souhaitée	— 3
1.3 Ouvrabilité	— 3
1.4 Agressivité du milieu ambiant	— 3
2. Méthodes expérimentales	— 4
2.1 Méthode de Bolomey	— 4
2.2 Méthode d'Abrams	— 4
2.3 Méthode de Faury	— 4
2.4 Méthode de Vallette	— 5
2.5 Méthode de Baron et Lesage	— 5
2.5.1 Recherche du minimum de vides	— 5
2.5.2 Recherche du minimum d'eau	— 6
2.5.3 Recherche du minimum de ségrégabilité	— 6
2.5.4 Fondement pratique de la méthode	— 7
2.5.5 Recherche de la maniabilité granulaire optimale	— 7
2.5.6 Recherche de la maniabilité nécessaire pour des conditions de mise en œuvre données	— 7
2.6 Méthode de Dreux et Gorisse	— 9
2.6.1 Énoncé du problème	— 9
2.6.2 Principe de la méthode	— 9
2.6.3 Dosage en ciment et en eau	— 9
2.6.4 Courbe granulaire de référence	— 10
2.6.5 Proportion des granulats	— 10
2.6.6 Masse des granulats	— 10
2.6.7 Tests pour mise au point de la formule de composition	— 11
2.6.8 Exemple d'application	— 11
2.7 Méthode simplifiée	— 12
Références bibliographiques	— 15

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

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

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

On dit par contre que l'on a une **granularité discontinue** lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires (exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et d'un gravier 20/50 mm (courbe B sur la figure A) ; le palier BB' atteste du manque d'éléments entre 5 et 20 mm.

Ces deux types de béton, **continu** et **discontinu**, ont eu chacun leurs chauds partisans ou détracteurs. À notre avis, il n'y a pas entre ces deux types de granularité, et malgré les apparences, de profondes différences justifiant la querelle encore persistante à leur égard ; d'ailleurs, dans la plupart des cas, la continuité ou la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités ; nous pensons que la granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité ; par contre, la granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant, en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité. Il semble toutefois que **la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue**.

Quelle que soit la méthode utilisée, la formule de composition **calculée** ne peut prétendre correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision, par le calcul, certaines qualités des constituants qui influent directement sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité, adhésivité des granulats, fines du sable, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc. C'est pourquoi, comme beaucoup de spécialistes en la matière, nous pensons que **le calcul d'un mélange n'est qu'une première approche de préparation de mélanges d'essais** qui permettront de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré, et dont les critères clairement définis (§ 1) constituent l'énoncé du problème posé. C'est selon ces principes que nous avons été amenés à la méthode exposée au paragraphe 2.6.

Le lecteur averti ne sera pas sans reconnaître dans cette méthode certains principes et règles déjà énoncés dans l'une ou dans l'autre des méthodes existantes ; nous ne le nions pas, bien au contraire, car nous avons cherché à réaliser une méthode simple et pratique, d'une part, mais qui, d'autre part, devait refléter la connaissance actuelle du béton dont les méthodes existantes sont évidemment la base. Nous n'avons pas cru devoir repousser, simplement pour pouvoir inventer autre chose, tout ce qui nous a semblé valable, de-ci de-là, dans les méthodes connues de nous : règle du module de finesse d'Abrams, méthodes de Bolomey, de Faury, de Vallette, de Joisel, de Lezy, de Baron et Lesage, méthode des volumes absolus du **factor specific gravity**, etc.

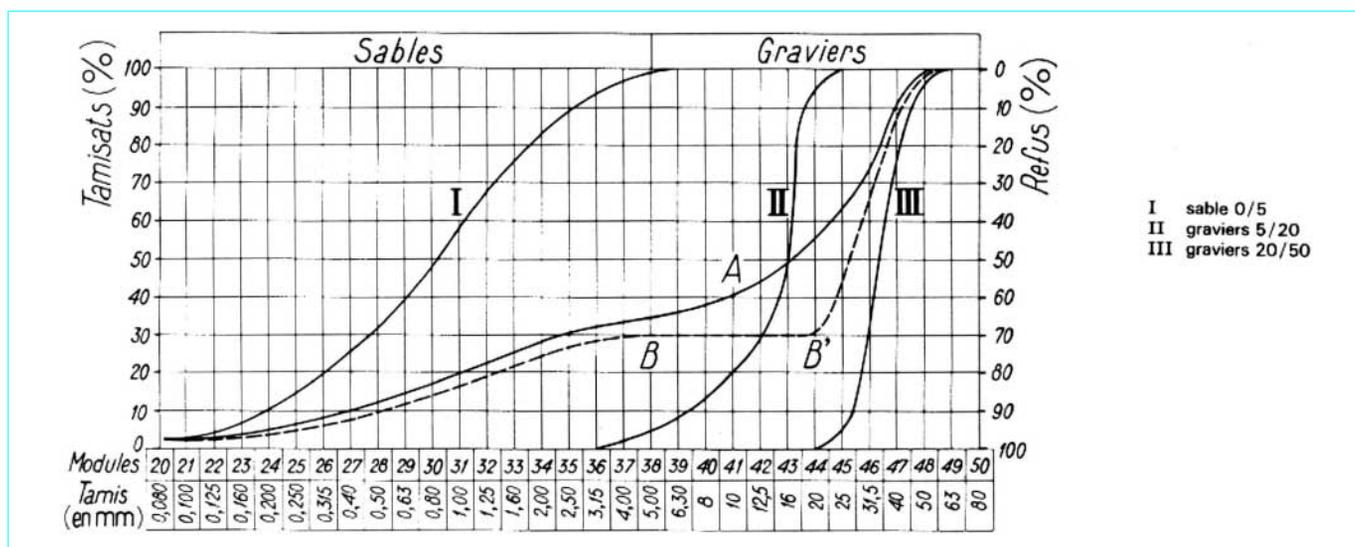


Figure A - Analyse granulométrique (d'après norme NF P 18-304)

1. Critères en fonction de la destination des bétons

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

À notre avis, quatre critères principaux doivent être retenus :

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

Ces critères sont retenus dans la norme P 18-305 concernant les bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans notre méthode de composition des bétons (§ 2.6).

1.1 Dimension maximale D des granulats

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrages, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage).

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

Caractéristiques de la pièce à bétonner		Valeur maximale de D
e	espacement entre armatures principales	e
r	rayon moyen des mailles de ferrailage	$0,8 r$
R	rayon moyen du moule	R
h_m	épaisseur minimale de la pièce	$h_m/5$

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

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

De plus, par rapport à la couverture c , épaisseur d'enrobage des armatures les plus proches du coffrage, on pourra adopter la règle inspirée des recommandations du Comité euro-international du béton (CEB) (tableau 2).

1.2 Résistance souhaitée

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

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

Tableau 2 – Enrobage minimal c des armatures

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

Nota : c doit, par ailleurs, être supérieur ou égal au diamètre des armatures (ou à la largeur du paquet d'armatures).

D'après les règlements en vigueur, on prend pour k la valeur 0,85 à 1,2 en général et selon les cas ; il convient donc de viser une résistance moyenne d'environ 15 à 20 % supérieure à la résistance caractéristique exigée.

Ce critère de résistance conduira au choix du ciment (nature, classe) et à son dosage, ainsi qu'au dosage en eau et à l'éventuelle utilisation d'adjuvants. Ce critère a également une influence sur le rapport G/S (proportion gravier/sable).

1.3 Ouvrabilité

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

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

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition (article *Caractères du béton* [C 2 240] dans ce traité).

1.4 Agressivité du milieu ambiant

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

La présence d'eaux agressives (eaux de mer, gypseuses, acides, très pures, etc.) et les conditions thermiques d'utilisation (revêtement de fours ou ouvrages soumis à des gels sévères) sont des considérations qui conditionnent surtout le choix du ciment et éventuellement la nature minéralogique des granulats, et parfois l'utilisation d'un adjuvant (article *Variétés de béton et constituants* [C 2 210] dans ce traité).

Tableau 3 – Consistance du béton

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

2. Méthodes expérimentales

2.1 Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

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

avec p pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ,

D diamètre du plus gros grain,

A varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue [1].

2.2 Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange fondée 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 telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum.

Nota : pour la définition du module de finesse d'un granulat, on se reportera à l'article *Variétés de béton et constituants* [C 2 210] du présent traité.

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le tableau 4 en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

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.

À 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 de gravier un module de finesse $M_f = 5,00$ par exemple (dosage en ciment 300 kg/m³).

Soit :

$$X_1 = M_{f1} - M_f = 6,50 - 5,00 = 1,50$$

$$X_2 = M_f - M_{f2} = 5,00 - 2,60 = 2,40$$

$$X = X_1 + X_2 = \dots \dots \frac{\dots}{3,90}$$

$$\text{Proportion de gravier } \frac{X_2}{X} = \frac{2,40}{3,90} = 62 \%$$

$$\text{Proportion de sable } \frac{X_1}{X} = \frac{1,50}{3,90} = 38 \%$$

Tout réside donc, dans cette méthode, sur le choix judicieux du module de finesse du mélange à réaliser (avec les granulats seuls). Ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que : forme, nature et dimension des granulats, dosage en ciment, résistance et plasticité désirées, etc. [2].

Tableau 4 – Valeurs optimales du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants
(d'après Abrams)

Dosage en ciment (kg/m ³)	Dimension maximale D des granulats (mm)						
	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

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* [3].

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 5 et D est exprimée en dimension passoire.

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

R est le rayon moyen du moule.

Exemple : 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 % pour $D = 100$ mm (courbe II, figure 1).

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

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

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

— *valeur minimale* : serrage, exceptionnellement puissant, granulats roulés, effet de paroi négligeable :

$$Y = 22 + 17 \sqrt[5]{25} = 54 \%$$

Ces valeurs donnent les courbes de référence tracées sur la figure 1 pour $D = 25$ mm (points de brisure I).

2.4 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 de 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 en ce qui concerne 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 de sable mouillé [1].

2.5 Méthode de Baron et Lesage

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

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

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

Le meilleur béton possède trois qualités :

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

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

2.5.1 Recherche du minimum de vides

Les auteurs ont montré, par expérience, que la compacité *c* d'un béton (volume de matière, eau comprise, après mise en place) et son temps d'écoulement *t* (sous l'effet d'une vibration) sont représentés avec une bonne approximation (corrélation *r* supérieure à 0,90) par l'une et l'autre des équations :

$$c = f_c c_0 + h_c \tag{1}$$

$$c = - f_{ct} \ln t + h_{ct} \tag{2}$$

avec f_c, h_c, f_{ct} et h_{ct} coefficients ne dépendant que des paramètres de la mise en œuvre (f_c et f_{ct} toujours positifs).

Les figures 2 et 3 donnent chacune des exemples des résultats obtenus lors de l'application des relations (1) et (2).

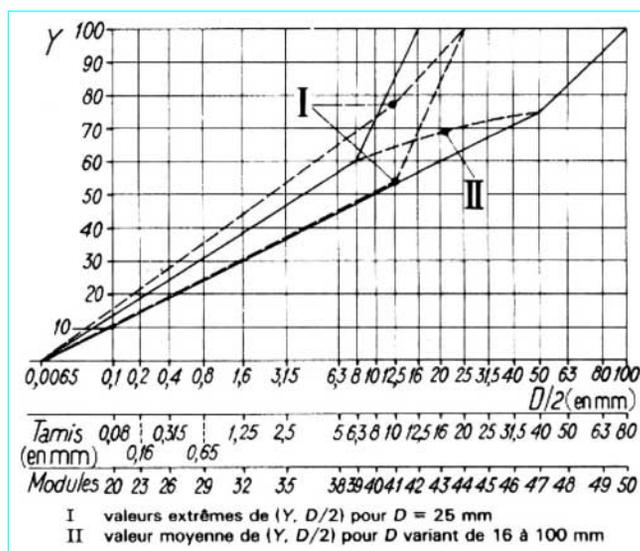


Figure 1 - Courbes de référence Faury

Tableau 5 – Valeurs 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	≥ 34	≥ 38
Consistance fluide pour faible serrage	30 à 32	32 à 34	36 à 38
Consistance molle pour serrage moyen	28 à 30	30 à 32	34 à 36
Consistance ferme pour serrage soigné	26 à 28	28 à 30	32 à 34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24 à 26	26 à 28	30 à 32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22 à 24	24 à 26	28 à 30
Serrage exceptionnellement puissant	< 22 (à déterminer dans chaque cas)	< 24 (à déterminer)	< 28 (à déterminer)

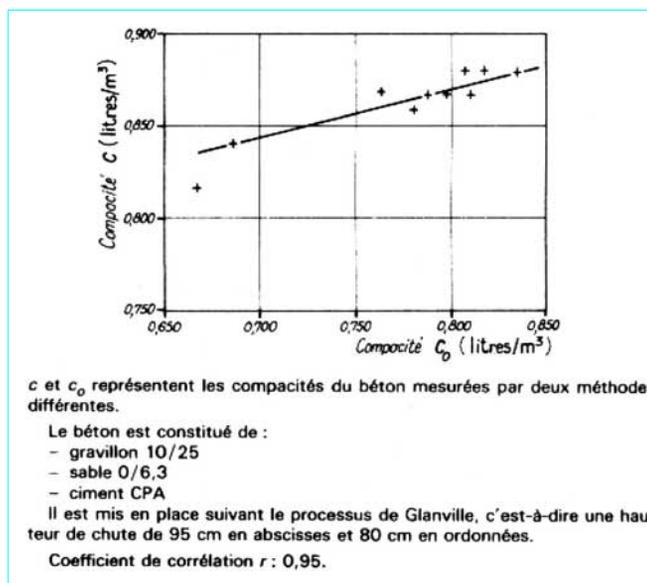


Figure 2 - Relation $c = f_c c_0 + h_c$

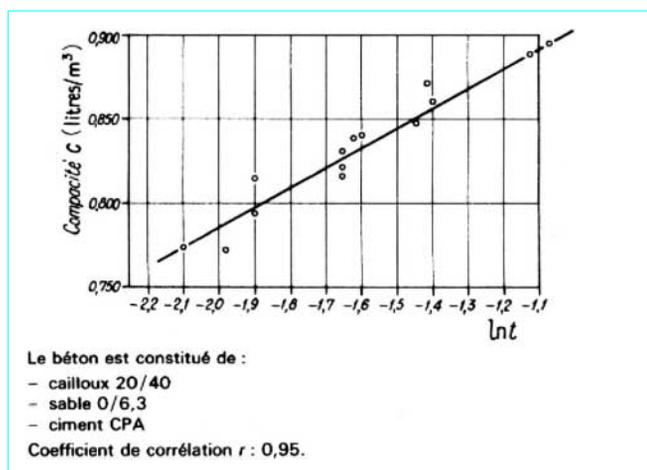


Figure 3 - Compacité en fonction du temps d'écoulement ($c = - f_{ct} \ln t + h_{ct}$)

La compacité de référence et le logarithme de temps de référence sont donc deux repérages de la maniabilité M définie comme la fonction qui regroupe, dans l'expression de la compacité, les paramètres intrinsèques relatifs au mélange des constituants du béton :

$$c = f M + h \tag{3}$$

f et h étant fonction des paramètres de mise en œuvre (f est toujours positif). À partir des équations précédentes, il est possible d'écrire, par symétrie :

$$\ln t = f' M + h'$$

avec t temps d'écoulement du béton mesuré au maniabilimètre jusqu'à un repère donné, dans des conditions d'écoulement définies par les fonctions f' et h' .

Plus la maniabilité est grande, plus le temps nécessaire à la mise en place est court et plus l'énergie nécessaire est faible.

Il en résulte qu'entre deux bétons le plus maniable est celui qui :

- se mettra le plus facilement en place ;
- sera le plus compact après mise en place.

Pour qu'un béton soit mis en place sans vides, il est nécessaire que sa maniabilité M_m soit :

$$M_m > (1 - h)/f$$

2.5.2 Recherche du minimum d'eau

Pour un mélange de constituants donnés, les auteurs ont montré, par expérience, que la maniabilité est une fonction de fonctions :

- l'une prenant en compte uniquement les paramètres du mélange des constituants solides ;
- les autres prenant en compte la teneur en eau.

Si M_0 est la maniabilité d'un béton dont la teneur en eau a été fixée arbitrairement à une valeur de référence, les expériences des auteurs montrent que la maniabilité, pour une teneur en eau quelconque, peut s'exprimer, quelles que soient les proportions des constituants, par la relation :

$$M = f_e M_0 + h_e$$

avec f_e et h_e coefficients fonction uniquement de la teneur en eau du béton (f_e toujours positif).

Ces résultats indiquent que les paramètres relatifs au mélange des constituants solides n'interviennent qu'à l'intérieur d'une seule fonction M_0 dont la forme ne dépend pas de la teneur en eau. Elle peut donc être étudiée séparément à partir d'une teneur en eau de référence.

La maniabilité d'un béton, pour une teneur en eau de référence, est ainsi un repérage de ce que les auteurs appellent la *maniabilité granulaire* N pouvant se définir comme la fonction qui regroupe, dans l'expression de la maniabilité, les paramètres relatifs au mélange des constituants solides :

$$M = f_e N + h_e$$

avec f_e et h_e coefficients fonction de la teneur en eau (f_e toujours positif).

2.5.3 Recherche du minimum de ségrégabilité

Dans le phénomène de ségrégation, il faut distinguer deux aspects :

- la ségrégation des constituants solides ;
- la ségrégation de l'eau.

En ce qui concerne le premier aspect, et pour des bétons composés de constituants de même nature, l'aptitude à la ségrégation dépend des proportions du mélange. Il paraît ainsi logique de supposer que, ségrégabilité et maniabilité étant des fonctions du même paramètre, elles peuvent ne pas être des fonctions indépendantes.

En ce qui concerne la ségrégation de l'eau, une quantité minimale d'eau est nécessaire à la mise en place correcte, pour des conditions de mise en œuvre et de *maniabilité granulaire* fixées. Lorsque cette quantité d'eau minimale ne peut être retenue au cours du transport ou de la mise en place du béton, il ne paraît pas réaliste de prendre en compte le seul critère de maniabilité. Le plus souvent, les auteurs estiment que l'on sera conduit, dans ce cas, à adopter une composition différente de celle qui conférerait une maniabilité granulaire maximale, et même à envisager l'apport de constituants nouveaux.

2.5.4 Fondement pratique de la méthode

L'aptitude d'un mélange à être mis en place pour former un béton compact peut donc être exprimée par une seule fonction : la *maniabilité*. À teneur en eau donnée, cette aptitude dépend du mélange des constituants solides, caractérisé par une seule fonction : la *maniabilité granulaire*.

Il est donc nécessaire de disposer d'un processus opératoire de repérage de la maniabilité pour étudier les variations de la maniabilité et de la maniabilité granulaire.

Pour repérer la maniabilité, il convient de mesurer, par application des équations (1), (2) et (3) précédentes, soit une compacité comme il a été dit, soit un temps d'écoulement.

Les auteurs utilisent, pour ce dernier repérage, l'appareil mis au point par l'un d'eux, le maniabilimètre Lesage (LCPC), et fabriqué par les Établissements Périer à Montrouge, qui permet la mesure précise du temps d'écoulement du béton entre deux états.

La figure 4 rappelle le fonctionnement de l'appareil.

Un mode opératoire (Laboratoire central des ponts et chaussées) précise les conditions de malaxage, la durée entre la fin de malaxage et le début de mise en place dans l'état *a* (figure 4), la mise en place dans cet état, la durée entre la fin de celle-ci et le début de l'écoulement.

2.5.5 Recherche de la maniabilité granulaire optimale

L'imprécision de la teneur en eau de référence, imprécision commune d'ailleurs à toutes les méthodes de composition, n'a ici, pour le repérage de la maniabilité granulaire, aucune influence sur la détermination de l'ensemble optimal des proportions des constituants solides, en raison même de l'existence de la fonction maniabilité granulaire.

Pour encadrer la valeur maximale recherchée, l'étude est conduite comme suit.

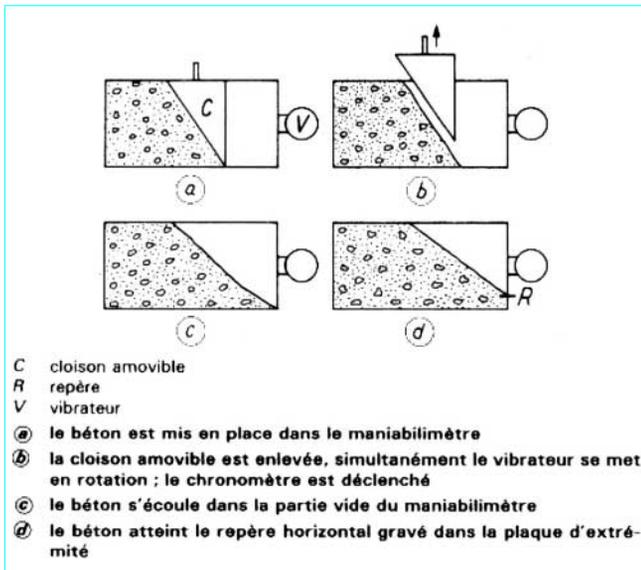


Figure 4 – Maniabilimètre Lesage

Un premier béton est constitué à partir de tous les constituants et d'une teneur en eau déterminée.

Soit R_1 = masse de sable/masse de granulats de ce béton.

Le processus des calculs pour une recherche du rapport optimal sable/granulats qui donne la maniabilité optimale est résumé dans le tableau 6.

Lorsque la maniabilité granulaire dépend de deux paramètres ($n = 3$), la variation peut être représentée sur un diagramme triangulaire analogue à celui utilisé par Féret lors de ses études sur la compacité (figure 5). L'étude expérimentale est faite en se fixant la valeur d'un des paramètres et en examinant l'influence du second.

Toutefois, il est à signaler qu'on ne peut décomposer l'étude du mélange de trois constituants *A*, *B* et *C* en :

- étude du mélange *A* et *B* ;
- étude du mélange *C* avec la proportion *A/B* optimale déterminée dans la première phase.

En effet, ce processus consisterait à n'étudier que les mélanges dont les points représentatifs seraient situés sur la droite *CX* (figure 5). En réalité, dans l'exemple cité, le lieu des points représentant la valeur optimale *A/B*, lorsqu'on ajoute *C*, est figuré par la courbe *Xy*.

2.5.6 Recherche de la maniabilité nécessaire pour des conditions de mise en œuvre données

Lorsque la maniabilité granulaire est fixée, la maniabilité augmente linéairement avec la teneur en eau (figure 6). Pour des conditions données de mise en œuvre, il existe une teneur en eau strictement nécessaire, au-dessous de laquelle le béton contiendrait des vides. Les auteurs appellent cette teneur en eau : *teneur en eau critique*.

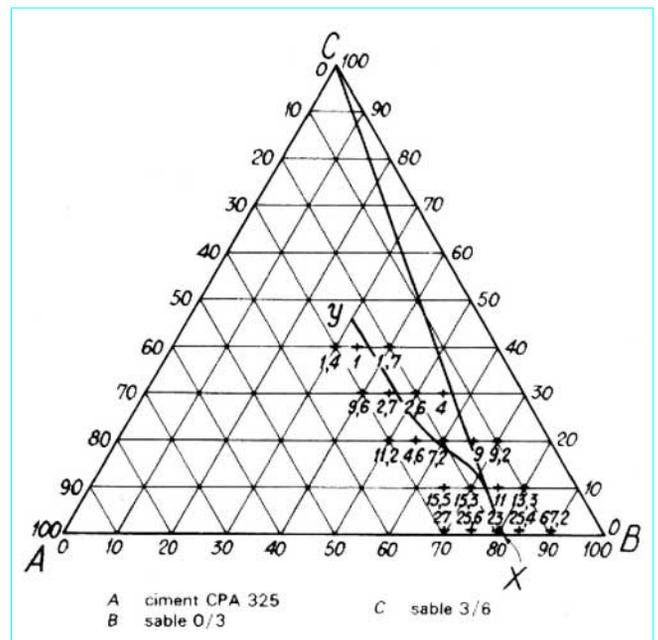


Figure 5 – Détermination de la composition d'un béton à trois constituants

Tableau 6 – Recherche du rapport optimal sable/granulats

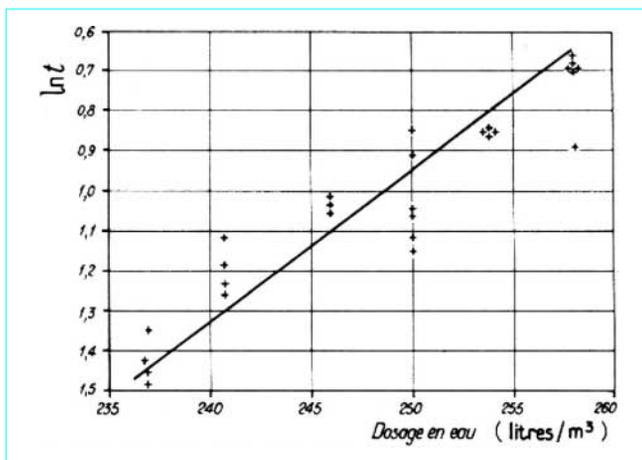
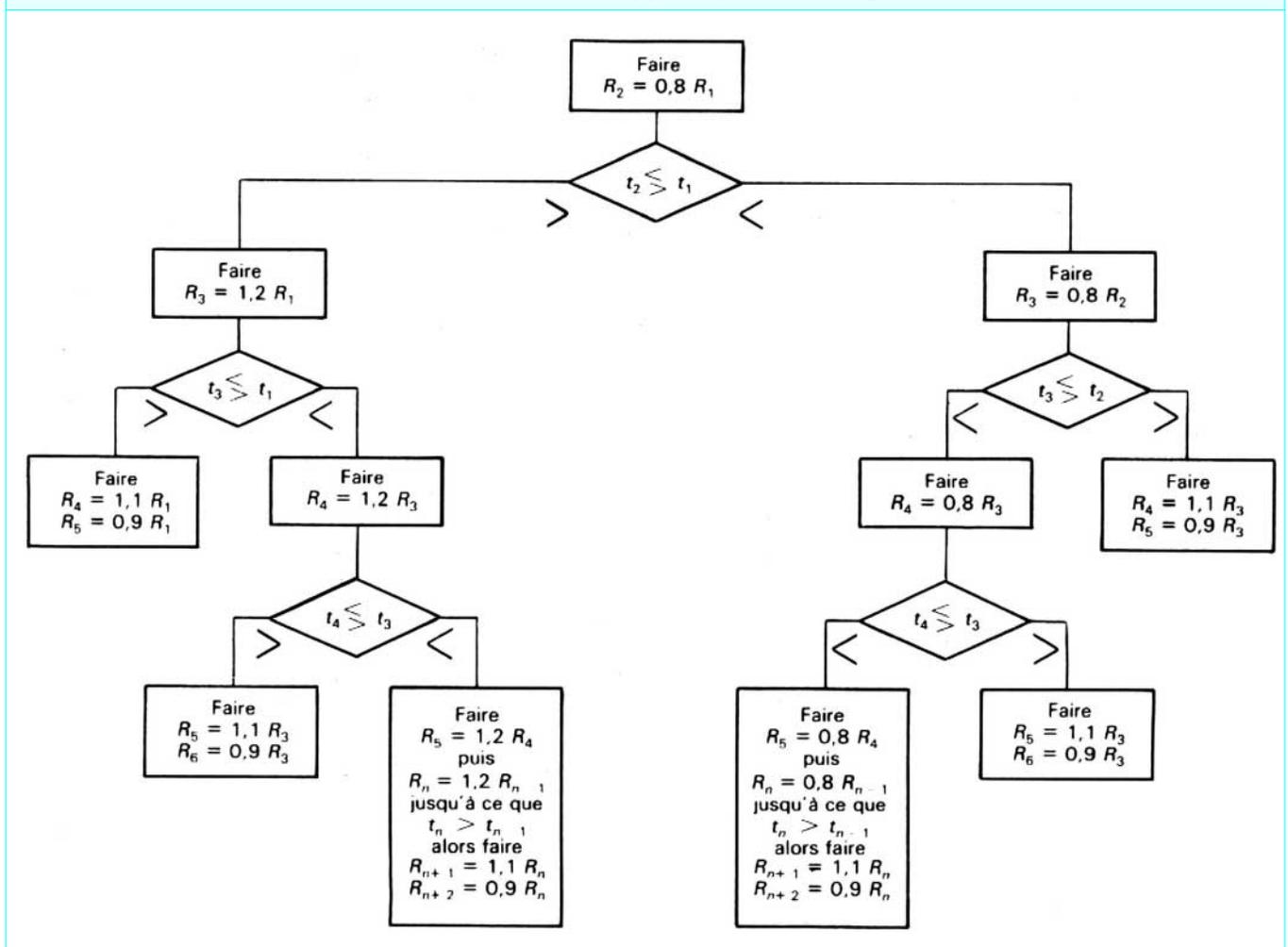


Figure 6 – Relation linéaire entre la maniabilité et la teneur en eau d'un béton

Pour les mêmes conditions de mise en œuvre, la teneur en eau critique est minimale lorsque la maniabilité granulaire est maximale.

À partir de la relation (2) (compacité du béton sur chantier et son temps d'écoulement au maniabilimètre Lesage), on déduit que la mise en place correcte du béton exige un temps d'écoulement inférieur à :

$$t_m = \frac{1 - h_t}{f_t}$$

La valeur de t_m dépend des conditions de mise en œuvre sur chantier et également du maniabilimètre et de son mode opératoire.

Actuellement, à partir du maniabilimètre Lesage, on estime les valeurs de t_m à :

- 8 à 10 s pour les bétons armés à assez forte densité d'armatures ;
- 12 à 15 s pour les bétons du type routier mis en place par machine à coffrages glissants.

Une remarque importante est à signaler : il faut prendre en compte le temps d'attente éventuel sur chantier, entre la fin du malaxage et le début de la mise en place. La maniabilité diminue

en effet linéairement en fonction du temps d'attente et, de ce fait, la teneur en eau critique augmente linéairement. La figure 7 donne des exemples de ces variations dont il y a lieu de tenir compte.

2.6 Méthode de Dreux et Gorisse

2.6.1 Énoncé du problème

Nous avons adopté comme critères de base les quatre critères mentionnés au paragraphe 1 :

- la **dimension maximale** D des granulats doit être fixée en premier lieu (§ 1.1) ;
- la **résistance souhaitée** R' (rupture en compression à 28 jours sur éprouvettes cylindriques) est prise égale pour la *valeur moyenne visée* à la résistance caractéristique demandée majorée de 15 % (§ 1.2) ;
- l'**ouvrabilité désirée** est fixée par l'affaissement A à obtenir par l'essai au cône (§ 1.3) ;
- la **nature du ciment** à utiliser doit tenir compte de l'agressivité du milieu ambiant (§ 1.4).

2.6.2 Principe de la méthode

La résistance et l'ouvrabilité désirées conduisent à déterminer le dosage en ciment et le dosage en eau.

Une courbe de référence granulaire est ensuite tracée schématiquement en tenant compte des différents paramètres concernant le béton étudié et ses constituants : dimension des granulats, dosage en ciment, plasticité, intensité du serrage, module de finesse du sable, pompabilité, etc.

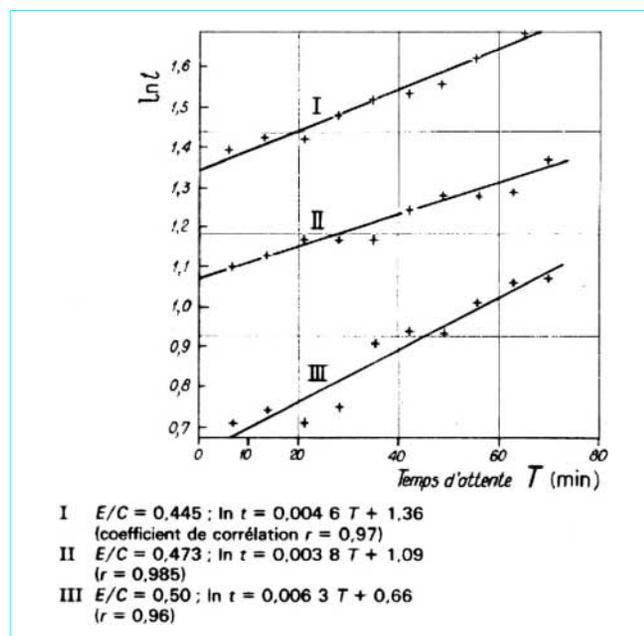


Figure 7 – Maniabilité en fonction du temps d'attente T entre la fin du malaxage et la mise en place

Cette courbe de référence permet de doser les proportions, en volume absolu, des différents granulats dont on dispose.

Enfin, la prise en compte d'un coefficient de compacité probable du béton et de la masse volumique des différents granulats permet d'aboutir à la formule de dosage pondéral pour le béton désiré. Reste à exécuter, bien entendu, quelques essais sur ce béton pour apporter à cette formule les corrections expérimentales nécessaires.

Remarque importante : cette méthode est une synthèse de ce qui nous est apparu comme le plus valable et le plus intéressant dans les méthodes existantes connues de nous. De plus, elle tient compte des résultats d'une grande enquête sur les dosages les plus usuels pour divers bétons jugés aujourd'hui satisfaisants. Elle n'a donc pas de bases scientifiques mais bénéficie sans restriction partisane de l'expérience déjà acquise par d'autres dans ce domaine et, de plus, bien entendu, de nos recherches au CEBTP. On pourra trouver les justifications concernant les abaques, les formules, les coefficients, etc., en [5].

2.6.3 Dosage en ciment et en eau

On commence par évaluer le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée R'_{28} (à 28 j) ; on utilise pour cela une formule inspirée des études de Bolomey :

$$R'_{28} = G \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

- avec R'_{28} (MPa) résistance moyenne souhaitée,
 G coefficient granulaire (densité, adhérence, dimension) que l'on peut choisir dans le tableau 7 ; à défaut de connaissance du granulats et en première approximation, on pourra adopter la valeur moyenne $G = 0,50$,
 C (kg/m^3) dosage en ciment,
 E (litres/m^3) dosage en eau totale,
 σ'_c (MPa) classe de résistance moyenne réelle du ciment.

Tableau 7 – Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

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

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

La connaissance ou l'évaluation de R'_{28} , G et σ'_c permet de calculer la valeur de C/E .

L'application de l'abaque de la figure 8 permet, en fonction de cette valeur de C/E et de l'affaissement souhaité A , de déterminer le dosage en ciment C ; la connaissance de ce dosage C et de la

valeur C/E permet d'évaluer approximativement le dosage en eau E qui sera ultérieurement corrigé expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (affaissement A au cône). Toutefois, pour une appréciation un peu moins aléatoire, on fera une première correction en fonction de la dimension des granulats, pour tenir compte de leur surface spécifique, en appliquant la correction indiquée au tableau 8. En effet, les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons pour lesquels la dimension maximale des granulats est 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*.

Tableau 8 – Correction sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si $D \neq 25$ mm)							
Dimension maximale D des granulats(mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau..... (%)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

■ 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 l'eau d'apport (contenue dans les granulats) ; cette appréciation est une difficulté sur le chantier et la meilleure façon de respecter le dosage en eau totale est de réaliser la plasticité prévue par l'affaissement au cône.

2.6.4 Courbe granulaire de référence

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sables + graviers mais ciment non compris) peut être schématisée suivant une ligne brisée tracée sur un graphique granulométrique normalisé ; son origine basse est à 0 % de tamisat pour la dimension 0,08 mm correspondant théoriquement aux plus petits grains de sable, et son extrémité haute à 100 % pour la dimension D correspondant aux plus gros granulats utilisés (figure 9).

Son point de brisure a pour coordonnées :

- X qui est égal à la graduation $D/2$ si $D \leq 20$ mm, ou au milieu du segment *graviers* si $D \geq 20$ mm ; ce segment *graviers* se trouve sur l'abscisse, de 5 mm à D ;
- $Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

avec K coefficient à choisir dans le tableau 9,

K_s coefficient tenant compte du module de finesse du sable M_f :

$$K_s = 6 M_f - 15$$

K_p coefficient de pompabilité pour le cas où le béton doit être de qualité *pompable* ; on peut prendre en général $K_p = + 5$ à $+ 10$ %.

■ Cas des gros bétons

Dans ce cas, lorsque $D \geq 50$ mm, le risque de ségrégation augmente et il est donc conseillé de charger un peu plus en sable pour diminuer cet inconvénient. Cela peut se faire en remontant un peu le point de brisure, en ajoutant à la valeur de Y la correction $(D - 25)/5$ en pour-cent, D étant exprimé en millimètres.

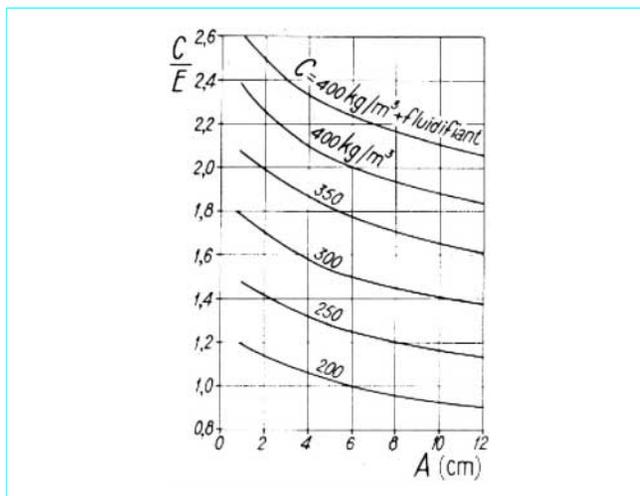


Figure 8 – Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment C à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône A)

La détermination du point de brisure permet de tracer alors la ligne brisée dite *courbe de référence* (ligne brisée OYD sur la figure 9).

2.6.5 Proportion des granulats

Sur le même graphique, on trace les courbes granulaires des différents granulats à utiliser. Les droites joignant le point à 95 % (tamisat) d'un granulats au point à 5 % du granulats suivant (et ainsi de suite) sont appelées *lignes de partage*. Les points d'intersection des lignes de partage successives donnent en *cumulés* les pourcentages correspondant aux différents granulats successifs. Il s'agit de pourcentages en *volumes absolus* dans l'unité de volume de béton frais en œuvre après serrage.

2.6.6 Masse des granulats

Il convient alors de faire appel à la notion de **coefficient de compacité** du béton. On définit celui-ci comme le rapport entre la somme des volumes absolus des constituants solides (granulats et ciment) et le volume de béton correspondant en œuvre que l'on prend ici égal à 1 000 litres.

On a donc
$$\gamma = \frac{V_g + V_c}{1000}$$

avec V_g et V_c (en litres) volumes absolus des granulats d'une part et du ciment d'autre part dans un mètre cube de béton en œuvre.

La connaissance du dosage en ciment C déjà fixé permet le calcul de V_c en supposant que la masse volumique du ciment est de 3,1 kg/litre. Le choix de la valeur de γ dans le tableau 10 permet de calculer le volume absolu V_g de l'ensemble des granulats : la connaissance du pourcentage de chacun d'eux permet alors de calculer leurs volumes absolus respectifs en litres pour un mètre cube de béton en œuvre. La connaissance de la masse volumique

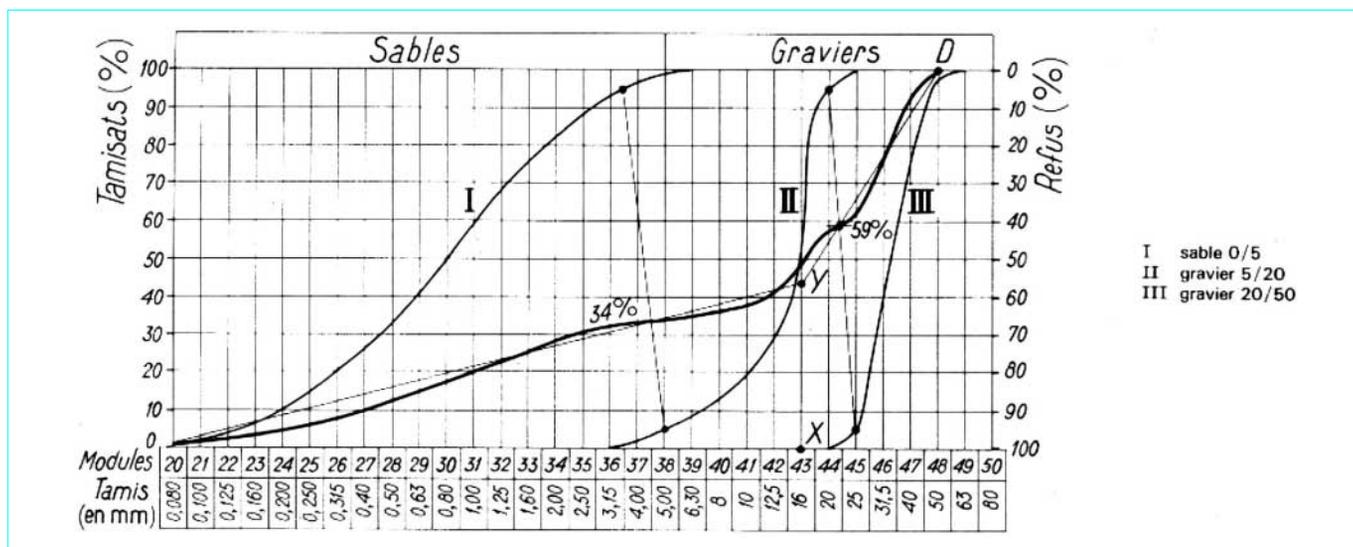


Figure 9 - Représentation des courbes granulaires des trois granulats utilisés

Tableau 9 - Valeurs du coefficient K

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (kg/m ³)	Forme des granulats (du sable en particulier)	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
	400 + fluidifiant	400 + fluidifiant	-2	0	-4	-2	-6
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

de chacun d'eux est alors nécessaire et permet de calculer la masse de chacun d'eux dans la formule de composition qui est alors complètement définie et qui, par addition des masses des différents constituants, donne la masse volumique théorique du béton frais en œuvre Δ_0 en kg/m³.

2.6.7 Tests pour mise au point de la formule de composition

Il convient maintenant de tester expérimentalement cette formule considérée comme une *première approche* et de l'ajuster, si nécessaire, en fonction des qualités souhaitées pour le béton.

■ **Dosage en eau** : on l'ajustera de manière à obtenir un béton de la plasticité désirée sans hésiter à corriger l'évaluation primitive en fonction de C/E ; toutefois, en cas de correction importante, il conviendra de corriger également le dosage en ciment pour maintenir la valeur prévue de C/E .

■ **Ajustage au mètre cube** : la formule calculée peut ne pas correspondre exactement à un mètre cube de béton en œuvre après

serrage et c'est pourtant le but à obtenir. On le vérifiera en fabriquant quelques éprouvettes vibrées dans les conditions normalisées et dont la pesée permettra de déterminer la masse volumique réelle Δ du béton frais en œuvre.

La comparaison de Δ et Δ_0 permet l'ajustage de la formule au mètre cube, en apportant sur la masse totale des granulats la correction :

$$x = 1\,000 (\Delta - \Delta_0) \text{ en kg}$$

Cette correction x (en plus ou en moins) sera répartie sur chacun des granulats en fonction de leurs pourcentages respectifs.

■ **Résistance** : la vérification que la résistance moyenne souhaitée sera bien obtenue ne peut se faire qu'à 28 jours sur éprouvettes conservées dans des conditions normalisées, à moins d'utiliser des tests accélérés [13]. Il est donc souhaitable, pour éviter de perdre trop de temps, de réaliser ces éprouvettes en utilisant en même temps trois dosages en ciment : le dosage C calculé, $C + 25$ kg et $C - 25$ kg tout en ajustant l'eau pour obtenir chaque fois la plasticité désirée ; l'ajout ou la suppression de 25 kg de ciment sera compensé par la suppression ou l'ajout de 20 kg de sable environ. Les résultats de ces trois dosages permettront d'établir la formule à utiliser en définitive.

2.6.8 Exemple d'application

Compte tenu des explications détaillées données précédemment, les calculs suivants sont présentés sans commentaires superflus.

■ **Énoncé** : composer un béton pour lequel les caractéristiques souhaitées sont :

$D = 50$ mm ; $A = 8$ cm (vibration normale) ; $R'_{28} = 35$ MPa, résistance caractéristique : $f_c = 30$ MPa.

En ce qui concerne la résistance, on visera évidemment une résistance *moyenne* supérieure à la résistance caractéristique : 35 MPa par exemple.

Tableau 10 – Valeurs du coefficient de compacité γ

Consistance	Serrage	Dimension D des granulats (en mm)						
		$D = 5$	$D = 10$	$D = 12,5$	$D = 20$	$D = 31,5$	$D = 60$	$D = 80$
Molle	Piquage.....	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible.....	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale.....	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage.....	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible.....	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale.....	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	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

Nota : ces valeurs sont convenables pour des *granulats roulés* sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :
 – sable roulé et gravier concassé : - 0,01 ;
 – sable et gravier concassé : - 0,03.

On dispose d'un sable 0/5 dont le module de finesse est 2,80 et de deux graviers 5/20 et 20/50 dont les courbes sont données sur la figure 9 ; ce sont des granulats roulés de bonne qualité. Les masses volumiques sont pour le sable 2,60 kg/litre et pour les graviers 2,55 kg/litre. Le ciment est un CPA de classe 45 MPa (norme NF P 15-301).

■ **Dosage en ciment et en eau** : application de la formule du paragraphe 2.6.3.

Nous prendrons $G \approx 0,55$ (granulats de bonne qualité).

$$35 = 0,55 \times 45 (C/E - 0,5)$$

d'où $C/E = 1,91$.

L'abaque de la figure 8 indique (pour une plasticité de 8 cm et un C/E de 1,91) un dosage en ciment de 400 kg/m³.

Le dosage en eau serait, en première approximation, de : 400/1,91 \approx 210 litres, toutefois, pour $D = 50$ mm, on est amené à faire une correction d'environ - 6 % (tableau 8) ; on aura donc $E \approx 197$ litres ce qui, pour le maintien de C/E à 1,91, ramène le dosage en ciment à 197 \times 1,91 = 376 kg/m³.

■ **Courbe de référence** :

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

$$Y = 50 - 7 - 1 + 2 = 44 \% \text{ car } K_s = 6 \times 2,80 - 15 = + 2$$

X est au milieu du segment graviers, de 5 à 50 mm, soit à 16 mm.

Le tracé des lignes de partage donne les proportions suivantes (figure 9) :

Sable 0/5	34 %
Gravier 5/20 = 59 - 34 =	25 %
Gravier 20/50 = 100 - 59 =	41 %
	100 %

■ **Volume absolu des granulats** : pour une consistance plastique nous obtenons un coefficient de compacité (tableau 10) $\gamma = 0,835$, d'où $V_g + V_c = 835$ litres.

$$V_c \text{ (volume absolu des grains de ciment)} = 376/3,1 = 121 \text{ litres.}$$

$$V_g \text{ (volume absolu des granulats)} = 835 - 121 = 714 \text{ litres.}$$

■ **Formule de composition pondérale** :

Poids de sable 0/5 : 714 \times 0,34 \times 2,60 =	632 kg
Poids de gravier 5/20 : 714 \times 0,25 \times 2,55 =	455 kg
Poids de gravier 20/50 : 714 \times 0,41 \times 2,55 =	747 kg
Poids de ciment.....	376 kg
Eau (totale sur matériaux secs)	197 kg
Densité théorique du béton frais	2 407 kg/m ³

Il reste à réaliser les essais pratiques prévus au paragraphe 2.6.7 pour tester cette formule de composition.

Par réduction d'ordonnée des courbes des granulats dans les proportions correspondant au mélange, on a tracé la courbe granulair du mélange proposé (figure 9).

2.7 Méthode simplifiée

De la méthode précédente dite *Dreux-Gorisse*, nous avons tiré une méthode simplifiée à l'usage des petites entreprises et artisans [11]. Cette méthode donne des dosages en volume et non pas en poids, car elle est conçue pour des petits chantiers qui ne sont pas équipés de centrales à bascule, mais de simples bétonnières où les granulats sont mesurés en volume (à la caisse ou à la brouette).

Le dosage d'un béton s'obtient par lecture directe sur un des trois abaques des figures 10, 11 et 12, à partir des données usuelles :

- *dimension des granulats* :
 - béton fin : $D = 16$ mm (figure 10),
 - béton normal : $D = 25$ mm (figure 11),
 - gros béton : $D = 40$ mm (figure 12) ;
- *résistance souhaitée* (exprimée ici en bars) :
 - de faible (150 bar),
 - à très élevée (400 bar) ;
- *plasticité désirée* :
 - de très ferme (affaissement $A < 2$ cm),
 - à très mou (affaissement $A = 14$ à 16 cm).

Sur chacun des abaques, on a tracé le circuit d'utilisation pour un exemple donné.

Figure 10 : béton fin, D = 16 mm

Béton mou (A = 10 cm) de résistance moyenne en compression (à 28 jours) : $f_c = 200$ bar.

Dosage à adopter :

– ciment	300 kg/m ³
– sable 0/5	625 litres
– gravier 5/16	705 litres
– eau	{ sur matériaux secs 190 litres { sur matériaux mouillés 80 litres
(environ)	

Figure 11 : béton normal, D = 25 mm

Béton mou (A = 11 cm) de résistance élevée : $f_c = 350$ bar.

Dosage à adopter :

– ciment	400 kg/m ³
(prévoir un adjuvant fluidifiant permettant de réduire le dosage en eau)	
– sable 0/5	440 litres
– gravier 5/25	795 litres
– eau	{ sur matériaux secs 160 litres { sur matériaux humides 105 litres
(environ)	

Nota : 1 Pa = 1 N/m² ou 1 MPa = 1 N/mm² = 0,1 hbar = 0,102 kgf/mm².

Figure 12 : gros béton, D = 40 mm

Béton plastique (A = 8 cm), résistance très bonne : $f_c = 300$ bar.

Dosage à adopter :

– ciment	350 kg/m ³
– sable 0/5	445 litres
– gravier 5/25	360 litres
– cailloux 20/40	500 litres
– eau	{ sur matériaux secs 165 litres { sur matériaux peu humides 140 litres
(environ)	

Remarque concernant le dosage de l'eau : comme toujours, dans ce domaine de la composition des bétons, le dosage précis de l'eau est difficile, compte tenu du degré (très variable) d'humidité des granulats. En pratique, la quantité d'eau à introduire dans la bétonnière sera ajustée de façon à obtenir la plasticité désirée.

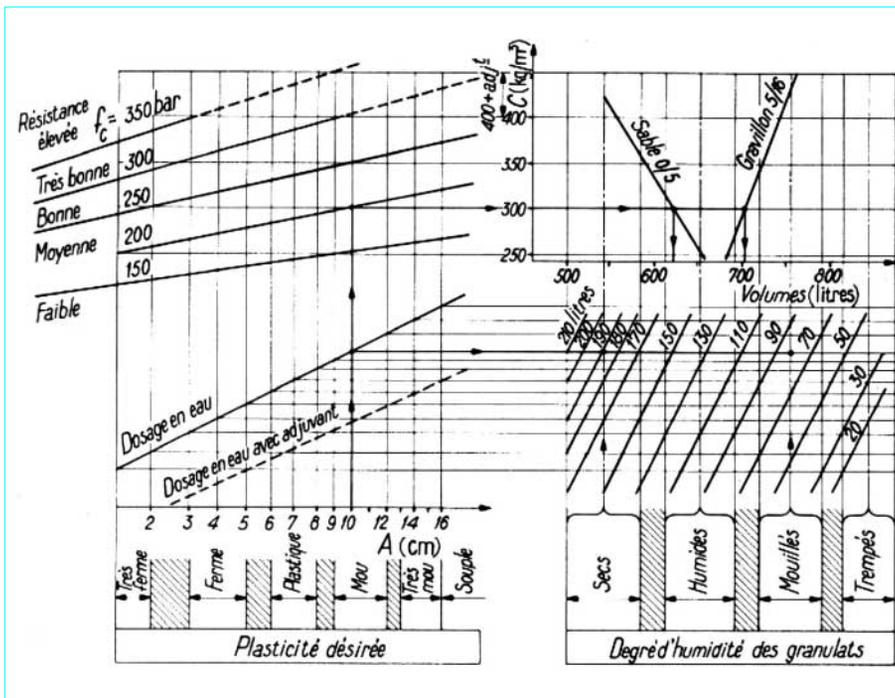


Figure 10 – Dosage d'un béton fin D = 16 mm

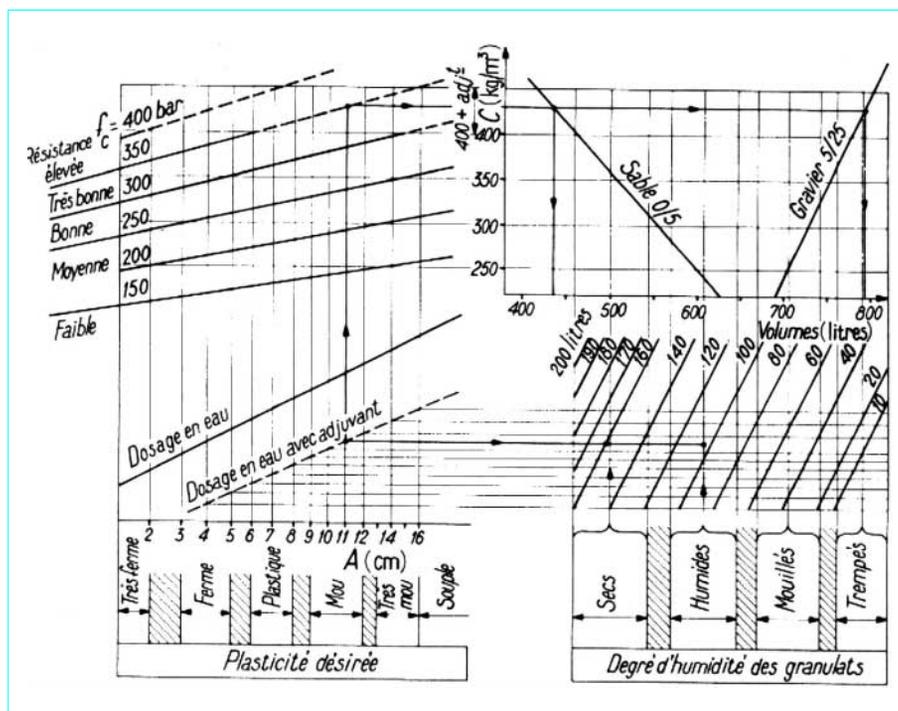


Figure 11 - Dosage d'un béton normal $D = 25$ mm

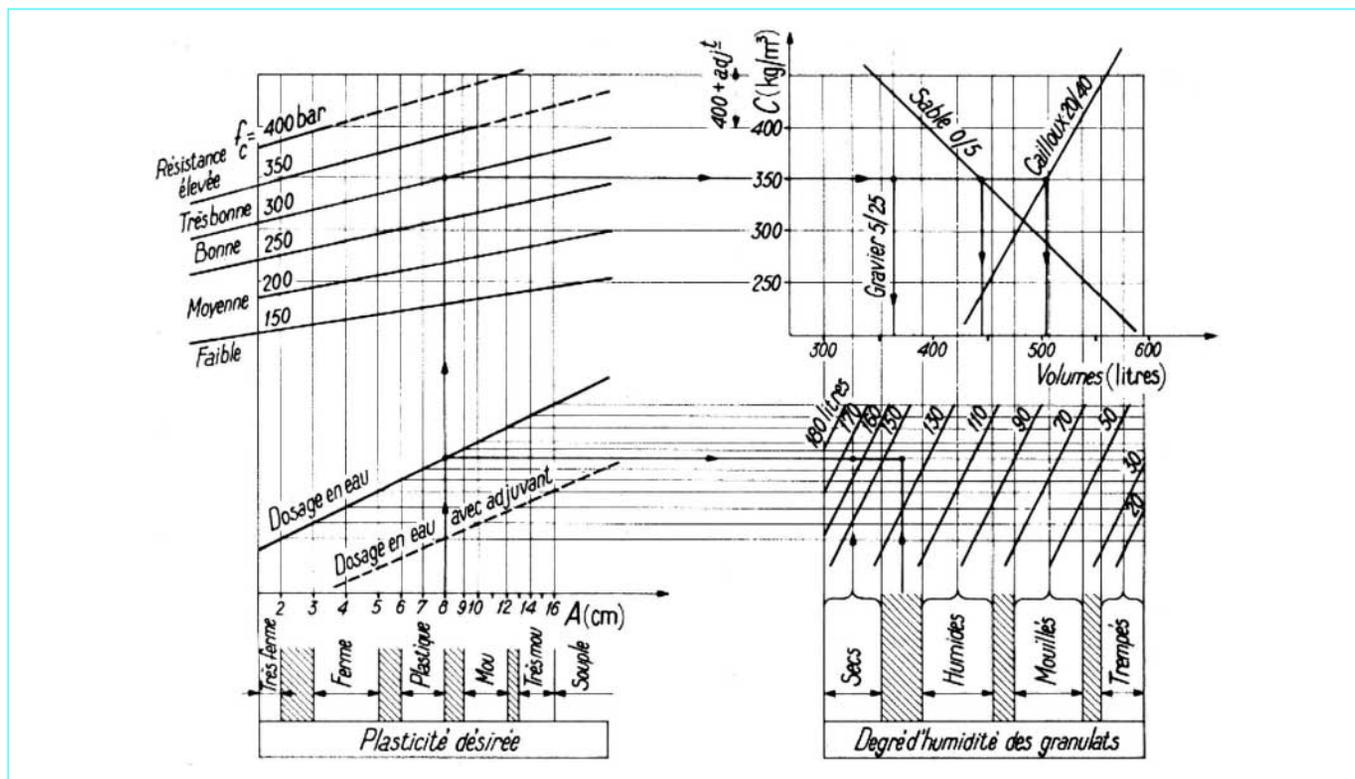


Figure 12 - Dosage d'un gros béton $D = 40$ mm

Références bibliographiques

- [1] VALLETTE (R.). – *Manuel de composition des bétons. Méthode expérimentale*. Eyrolles (1963).
- [2] Bull. Liaison Lab. Central Ponts et Chaussées (F), n° 20, juil.-août 1966.
- [3] FAURY (J.). – *Le Béton. Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition*. 3^e éd., Dunod (1958).
- [4] BARON (J.) et LESAGE (R.). – *Fondements théoriques et pratiques d'une méthode de composition des bétons*. Communication au Premier Symposium Européen sur les Revêtements Bétonnés Paris, Lab. Central Ponts et Chaussées, 2-4 juil. 1969.
- [5] DREUX (G.). – *Nouveau guide du béton*. Eyrolles (1978).
- [6] CAQUOT (A.). – *La composition des bétons hydrauliques*. Mém. Sté Ing. Civils France, juil.-août 1937.
- [7] JOISEL (A.). – *Composition des bétons hydrauliques*. Supplément aux Ann. ITBTP (F), n° 58, Série Béton, Béton Armé, oct. 1952.
- [8] LEZY (R.). – *Détermination du dosage d'un béton hydraulique à compacité optimale*. Ann. Ponts et Chaussées (F), nov.-déc. 1955.
- [9] L'HERMITE (R.). – *Idées actuelles sur la technologie du béton*. Document Techn. Bâtiment Travaux Publics (1955).
- [10] VIRONNAUD (L.). – *Importance relative des erreurs des dosages dans la confection des bétons*. Ann. ITBTP (F), mars-avril 1960.
- [11] DREUX (G.). – *Du béton à la carte*. Bâtir (F), fév. 1971.
- [12] DREUX (G.). – *Contribution à l'étude statistique des contrôles de béton*. Ann. ITBTP (F), fév. 1973.
- [13] GORISSE (F.). – *Mise au point d'un test accéléré*. Ann. ITBTP (F), fév. 1973.
- [14] GORISSE (F.). – *Essais et contrôles des bétons*. Eyrolles (1978).