

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 105 (1979)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Etanchéité à l'eau des constructions, rôle de la qualité du béton  
**Autor:** Alou, Fermin  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73825>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Étanchéité à l'eau des constructions, rôle de la qualité du béton

par Fermin Alou, Lausanne

Le but de cet exposé est d'étudier l'influence des différents facteurs jouant un rôle sur l'imperméabilité du béton.

Il nous semble évident que l'utilisation d'un béton imperméable n'est pas une condition suffisante pour aboutir à des constructions étanches.

Selon Duriez : « ... une construction est étanche lorsqu'elle est constituée par des matériaux imperméables et qui sont appelés à le demeurer, en dépit des modifications de structure que la construction tout entière peut être appelée à subir, pourvu que ces transformations soient des transformations normales et prévisibles et ne résultant pas d'accidents fortuits, extérieurs à la construction elle-même. » On voit donc que le béton imperméable est nécessaire, mais dans la plupart des cas il n'est pas suffisant car généralement on n'est pas à l'abri d'une fissuration (retrait, tassement), d'un nid de gravier, d'une reprise de bétonnage mal faite, d'une traversée de canalisation, etc. C'est la raison pour laquelle on applique des « étanchéités » à base de produits bitumineux par exemple sur les constructions en béton.

Il n'en est pas moins vrai que parfois ces « étanchéités » présentent aussi des défauts et dans ces cas, si le béton est imperméable et la construction à peu près étanche, les risques d'avoir des dégâts dus à l'eau diminuent.

Alors, que doit-on faire pour obtenir des bétons imperméables ?

Pour tenter de répondre à cette question, nous allons examiner les différents facteurs les uns après les autres.

## 1. Ciment

### 1.1 Type

Pour qu'un béton soit imperméable à l'eau, il faut d'abord que le ciment utilisé soit résistant chimiquement à l'action de cette eau. Par exemple, lorsqu'un béton doit être en contact avec des eaux sulfatées ou des eaux pures, le choix d'un ciment particulier s'impose. La manière d'opérer ce choix devrait faire l'objet d'un exposé à part.

Dans tout ce qui va suivre, nous admettons donc qu'il n'y a pas d'attaque chimique possible et que par conséquent un ciment Portland ordinaire donne satisfaction.

Toutefois, parmi les ciments Portland on peut faire la distinction entre le ciment Portland normal (CPN) et le ciment Portland à haute résistance (CPHR) : la différence essentielle entre ces ciments est la finesse de mouture.

Etant donné que, toutes autres choses égales par ailleurs, le CPHR, par rapport au CPN, dégage plus de chaleur à court terme et présente un retrait hydraulique plus grand, nous préférons utiliser le CPN lorsque l'on veut obtenir des bétons imperméables.

### 1.2 Dosage

Il faut que la quantité de pâte de ciment soit suffisante pour enrober tous les grains inertes et combler tous les vides entre les grains.

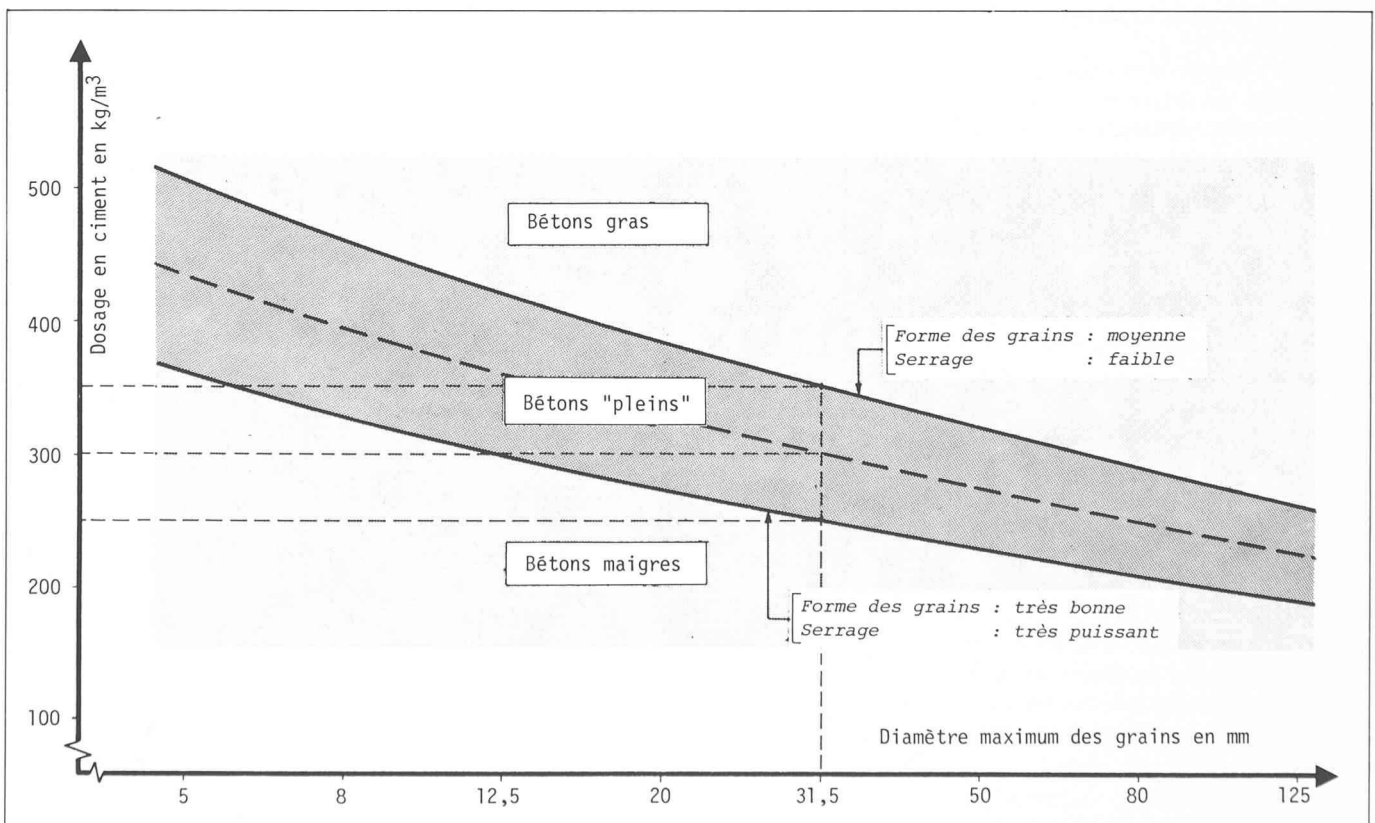


Figure 1. — Dosage en ciment en fonction du diamètre maximal des grains.

Selon Duriez : « Un béton, même à ossature très compacte, où seuls les interstices de vides entre les grains seraient comblés, les faces en regard ne comprenant pas de film de pâte (eau + ciment) interposé, ne pourrait être entièrement satisfaisant : sa compacité et sa résistance à l'écrasement pourraient être élevées ; sa cohésion pourrait sembler acceptable dans l'ensemble ; néanmoins un tel béton aurait une résistance à la traction et à la flexion insuffisante ; il présenterait de la fragilité et surtout une grande perméabilité par cheminement capillaire aux interfaces : son étanchéité aux liquides ne pourrait que donner lieu à des mécomptes (béton très hygroscopique, même très compact). »

D'après Caquot, le dosage en ciment peut se calculer au moyen de la formule :

$$C = \frac{K}{\sqrt[5]{D}}$$

où :  $C$  = Dosage en ciment en  $\text{kg}/\text{m}^3$

$D$  = Diamètre max. des grains en mm

$K$  = Paramètre qui dépend de la nature et de la forme des grains et des moyens de compactage

La valeur de  $K$  varie généralement entre 500 et 700. Notons que pour les bétons usuels où  $D = 30$  mm, on a :  $\sqrt[5]{D} \approx 2$  et si l'on admet  $K = 600$ , on trouve  $C = 300 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Nous pensons toutefois que la valeur  $K = 600$  est trop faible ; pour obtenir des bétons imperméables, il faudrait dans la plupart des cas avoir un  $K$  compris entre 650 et 700, ce qui donnerait, pour  $D = 30$  mm, des dosages de 325 à 350  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

La figure 1 montre la variation du dosage en fonction du diamètre maximum des grains pour les valeurs habituelles de  $K$ .

Remarque :

Lorsque le dosage en ciment est inférieur à  $\frac{K}{\sqrt[5]{D}}$  on obtient des bétons maigres et nécessairement creux et perméables ; par contre, si le dosage est supérieur à  $\frac{K}{\sqrt[5]{D}}$  on a des bétons gras.

## 2. Granulats

Les granulats représentent dans un béton environ 80 % en poids ou 75 % en volume.

Les granulats doivent :

- Etre stables et durables. Pour ceci il suffit en général de choisir des granulats compacts (ou très peu poreux).
- Etre propres afin d'assurer une bonne adhérence de la pâte liante.
- Donner un mélange compact pour réduire le volume de pâte liante, ce qui nécessite des grains de forme correcte, une bonne composition granu-

lométrique et une teneur en éléments fins limitée.

Il faut signaler que si les granulats roulés donnent généralement des mélanges plus compacts que les concassés, l'adhérence de la pâte liante aux surfaces lisses des grains roulés est moins bonne. D'autre part on a constaté que l'adhérence de la pâte liante est meilleure sur les granulats calcaires que sur les siliceux ; ceci est probablement dû à un phénomène d'épitaxie.

On peut encore citer un avantage des granulats calcaires : le coefficient de dilatation ( $0,7 \cdot 10^{-5}$ ) est plus faible que celui des granulats siliceux ( $1,3 \cdot 10^{-5}$ ). Le béton avec des granulats calcaires subit donc des variations volumétriques plus faibles lors des changements de température.

En ce qui concerne la composition granulométrique, nous pensons qu'il est réellement difficile de fixer, a priori, une courbe de référence.

En général, les mélanges, liant non compris, qui se trouvent entre les courbes A

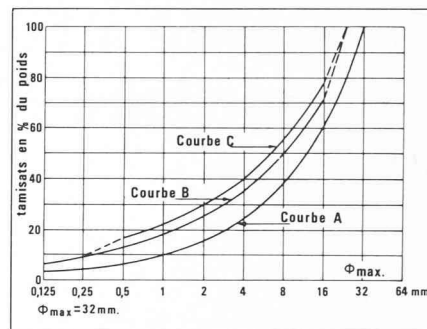


Fig. 2. — Courbes granulométriques des granulats seuls d'après la norme SIA 162.

et B des Normes SIA donnent des bons résultats pour autant que la forme des grains soit correcte (fig. 2).

Les deux courbes A et B diffèrent essentiellement en la quantité de sable fin 0/3. Nous préférons les mélanges du type B, avec peut-être un léger excès de sable, car la courbe A, qui est une composition à minimum de sable, est très sensible et une légère erreur en moins sur la teneur en sable conduit à des bétons nécessairement creux.

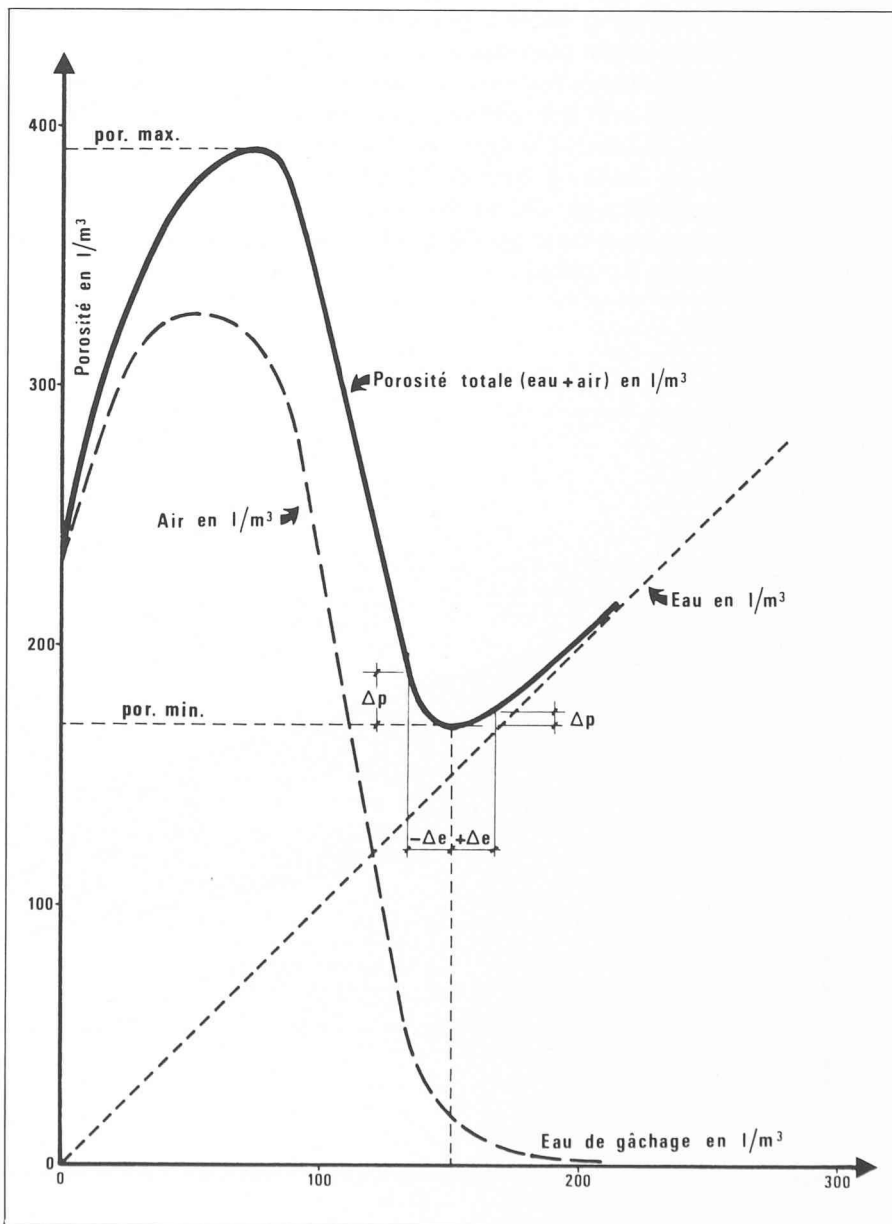


Fig. 3. — Porosité d'un mélange « ciment-granulats » en fonction de la teneur en eau.

### 3. Teneur en eau

La quantité d'eau de gâchage est probablement le facteur le plus important, avec la teneur en air, pour l'obtention de bétons de bonne qualité en général et étanches en particulier.

Lorsque la teneur en ciment (dosage) et les granulats (type, nature, composition) sont fixés, la compacité ne dépend plus que de la quantité d'eau pour un mode de serrage bien défini. A notre avis, la teneur en eau doit être fixée de telle manière que la compacité soit maximum. La figure 3 donne la variation de la porosité en fonction de la quantité d'eau. Il est intéressant de remarquer qu'une même variation de la quantité d'eau ( $\Delta e$ ) par rapport à la valeur optimum est plus néfaste si elle est négative que si elle est positive.

### 4. Teneur en air

#### 4.1 Bétons usuels

La teneur en air joue un rôle à peu près identique à celui de l'eau, du moins pour les bétons courants sans adjuvant. Cet air que l'on peut appeler accidentel, car en principe on voudrait l'éliminer, est dû à des défauts de compactage. Il se trouve dans les bétons sous forme de bulles d'un diamètre important et il est pratiquement impossible de l'éliminer avec les moyens de serrage habituels.

La quantité d'air ne reste pas constante dans le temps car si le béton est maintenu à l'air, une partie de l'eau de gâchage s'évapore, ce qui provoque une augmentation de la teneur en air et s'il est maintenu dans l'eau il se sature et par conséquent la teneur en air diminue.

D'après l'ACI (American Concrete Institute) on considère que le béton frais est « plein » pour les teneurs en air suivantes:

D (max)	10	12,5	20	25	40	50	70	150
Teneur en air %	3	2,5	2	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2

#### 4.2 Bétons avec adjuvants

L'air des bétons avec certains adjuvants est tout à fait différent du précédent. D'après Venuat, une grande partie de l'effet fluidifiant des adjuvants est dû à l'effet de la transformation de l'air accidentel en air sous forme de petites bulles dont le diamètre est inférieur à 100  $\mu\text{m}$ , mais sans entraînement d'air supplémentaire.

### 5. Rapport C/E (ou E/C)

On a généralement l'habitude de considérer le rapport  $E/C$  comme l'un des facteurs les plus importants de la composition du béton, si ce n'est le plus impor-

tant. Mais à notre avis, il n'en est rien. En effet, lorsque l'on compare des bétons, deux cas seulement peuvent se présenter :

- a) Bétons de même dosage en ciment.
- b) Bétons de dosages différents.

Dans le premier cas, le rapport  $E/C$  est proportionnel à  $E$  et il nous semble plus simple de tenir compte uniquement de la variation de  $E$  plutôt que de la variation de  $E/C$ .

Dans le deuxième cas, les essais de Schlotmann (fig. 4) montrent que pour un même rapport  $E/C$ , la qualité (résistance à la compression en particulier) diminue lorsque le volume de pâte augmente et ceci à partir d'une certaine valeur qui dépend essentiellement de la porosité de la granulométrie.

Pour montrer qu'il en est de même lorsque l'on prend comme variable le

dosage en ciment, nous avons établi le graphique ci-dessous (fig. 5). Le calcul du dosage, à partir du volume de pâte, est très simple et on trouve :

$$C \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{volume de pâte en litres}}{0,32 + \alpha}$$

$$\text{où : } \alpha = \text{rapport } E/C \text{ et } 0,32 \approx \frac{1}{3,1} \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\text{poids spécifique ciment}}$$

Ce fait qui peut surprendre au premier abord nous semble évident, car si l'on augmente le volume de pâte (à  $E/C$  constant) on doit diminuer en conséquence le volume de granulats ; or les granulats de bonne qualité sont plus résistants, plus stables et moins poreux que la pâte de ciment durcie.

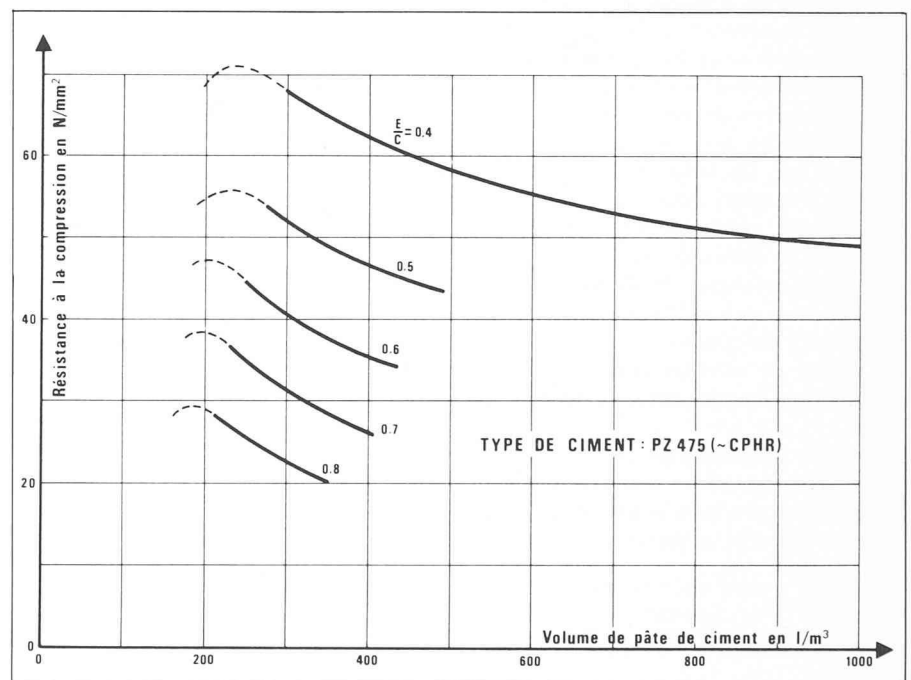


Fig. 4. — Résistance à la compression en fonction du volume de pâte (d'après Schlotmann).

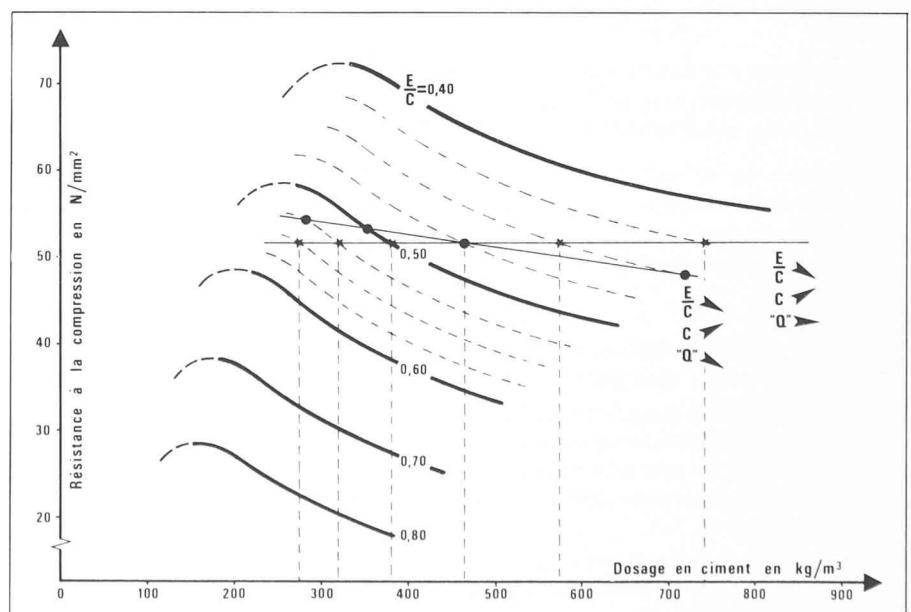


Fig. 5. — « Qualité » du béton en fonction du dosage et du rapport  $E/C$ .

### 6. Adjuvants

Il peut être intéressant d'utiliser certains adjuvants pour améliorer l'étanchéité du béton et nous pensons surtout aux réducteurs d'eau qui permettent, pour une même consistance, de diminuer notablement la quantité d'eau et d'augmenter la compacité. Les entraîneurs d'air donnent aussi des bons résultats car les fines bulles d'air, lorsqu'elles sont bien réparties dans la masse, constituent des vases d'expansion et coupent les mouvements capillaires : la circulation des liquides en est ralentie.

### 7. Malaxage

On obtient un mélange homogène des différents composants du béton au moyen de bétonnières ou de malaxeurs. L'homogénéité est évidemment fonction du temps de malaxage et du type d'engin utilisé. Les malaxeurs sont généralement plus efficaces que les bétonnières et ils permettent d'obtenir, pour un même temps de malaxage, des bétons plus homogènes. Le temps de malaxage est fonction de la vitesse de rotation, du diamètre de la cuve et dans une moindre mesure de la consistance du béton.

La vitesse de rotation doit être limitée afin d'éviter la ségrégation (force centrifuge).

Le temps de malaxage doit être court afin d'assurer un débit convenable.

Pour obtenir des bons bétons, L'Hermite propose la méthode suivante :

Soit  $N$  la vitesse de rotation en tours/minute et  $D$  le diamètre de la cuve en mètres ; on doit avoir :

- pour les bétonnières :  $DN^2 \simeq 400$  }
- pour les malaxeurs :  $DN^2 \simeq 225$  }

et pour  $D = 1$  m  $\left\{ \begin{array}{l} N \simeq 20 \text{ t/m} \\ N \simeq 15 \text{ t/m} \end{array} \right.$

Pour un mélangeur fonctionnant dans de bonnes conditions, avec un béton plastique, le temps minimum est de :

- 2 minutes ou 40 tours } pour les bétonnières
  - 1 minute ou 15 tours } pour les malaxeurs
- si  $D = 1$  m

**Remarques :**

1. Si le temps de malaxage est insuffisant, le béton n'est pas homogène.
2. Si le temps de malaxage est trop long, il peut se produire une usure des granulats (lorsqu'ils sont friables) ce qui a pour conséquence de changer le % de matières fines.
3. En général un temps de malaxage trop long est moins préjudiciable qu'un temps de malaxage trop court.
4. Le temps de malaxage est fonction de la plasticité du béton : plus le béton

est sec, plus il faut du temps pour obtenir un mélange homogène.

### 8. Consistance

C'est, à notre avis du moins, la caractéristique la plus importante du béton frais. Elle doit être choisie en fonction du type d'ouvrage et des moyens de mise en place dont on dispose.

On devrait toujours se fixer la consistance et adapter la composition du béton (granulométrie, dosage en ciment, teneur en eau, etc.) à cette consistance et non pas le contraire comme on le fait d'habitude.

On doit signaler que lorsque la granulométrie et le dosage en ciment sont bien choisis, il faut très peu d'eau en plus pour améliorer sensiblement la plasticité. D'ailleurs, l'augmentation de la teneur en eau, pour une même mise en place, est généralement accompagnée par une diminution de la teneur en air : ainsi, la compacité du mélange est au moins main-

tenue. Des bétons de consistance terre humide (affaissement au cône d'Abrams :  $< 2$  cm) devraient être proscrits pour les ouvrages dont on veut garantir l'étanchéité ; même lorsqu'on prend toutes les précautions on n'est pas à l'abri d'un nid de gravier.

On peut remarquer encore qu'à consistance constante la qualité du béton augmente avec le dosage en ciment. Nous reproduisons ci-après les résultats des essais de Graf, Albrecht et Schäffler effectués à consistance constante (fig. 6). On constate que la résistance croît fortement avec le dosage en ciment jusqu'à des valeurs de l'ordre de  $400 \text{ kg/m}^3$  ; au-delà, le gain est pratiquement nul ; il en est probablement de même pour l'imperméabilité.

On peut remarquer aussi que pour les dosages compris entre  $206$  et  $415 \text{ kg/m}^3$ , le facteur  $E/C$  passe de  $0,63$  à  $0,35$ , ce qui correspond à des quantités d'eau de  $130$  et  $145 \text{ litres/m}^3$  respectivement. Dans cet intervalle de dosages, qui comprend plus de  $90\%$  des bétons usuels,

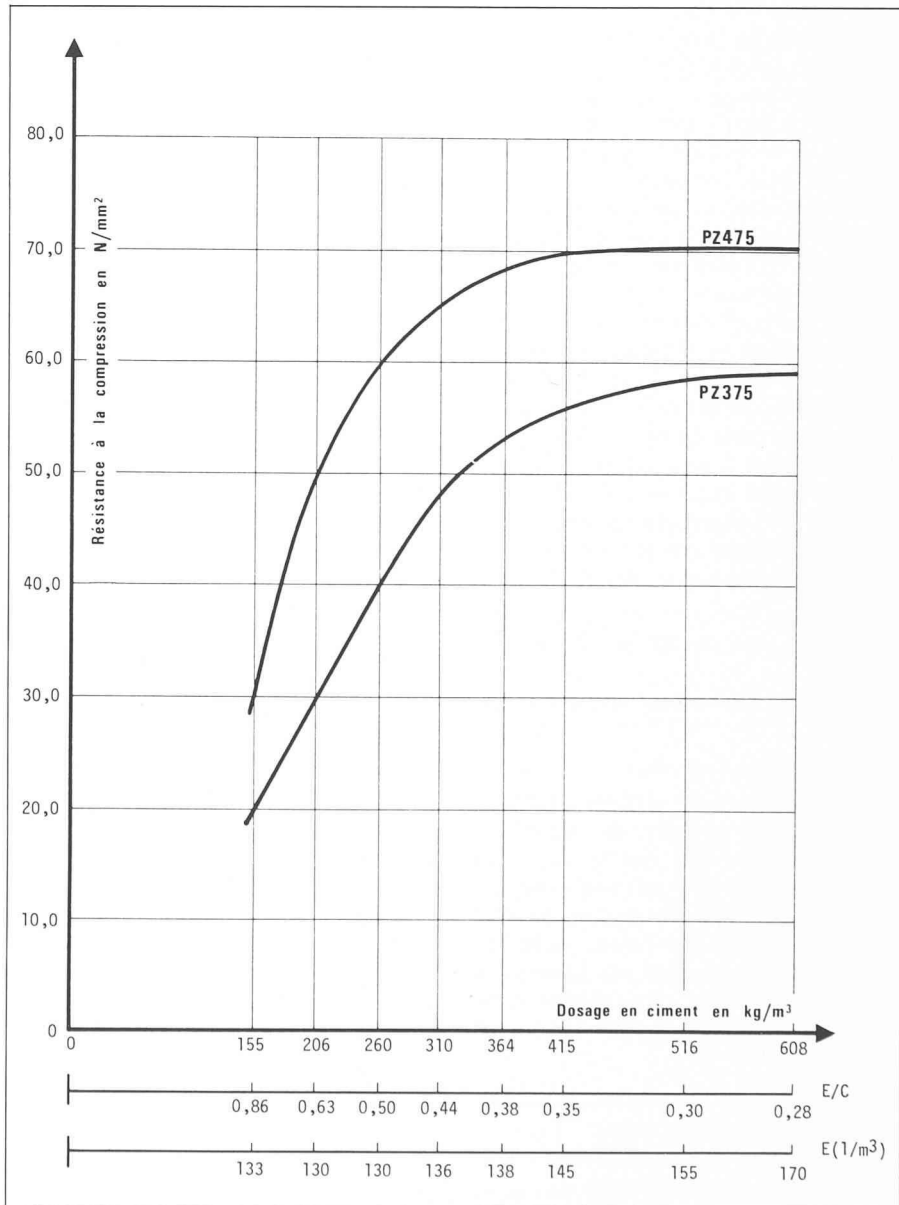


Fig. 6. — Résistance à la compression en fonction du dosage en ciment. Bétons de même consistance (d'après Graf)

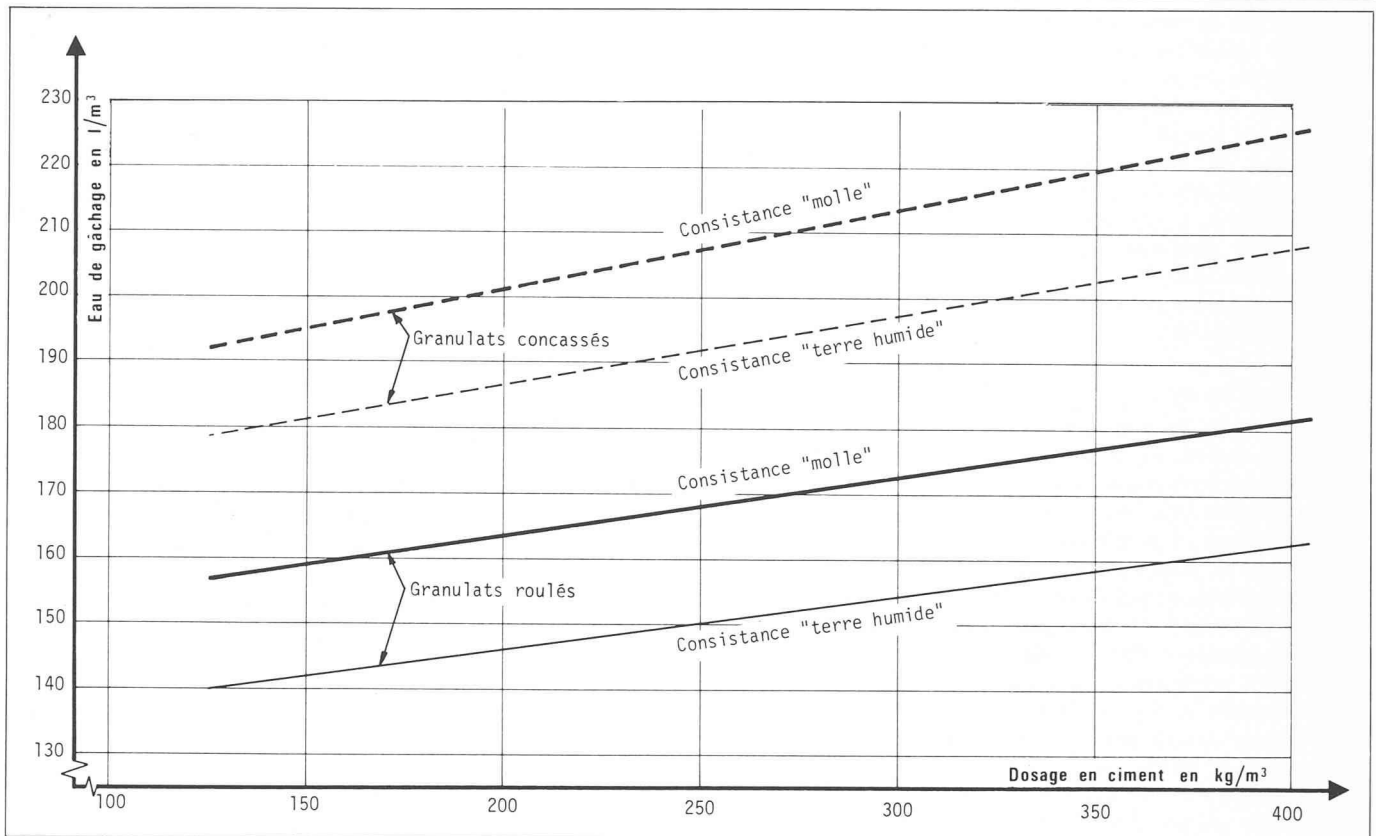


Figure 7. — Eau de gâchage en fonction du dosage en ciment. Bétons de même consistance (d'après « Règles concernant la composition des bétons »).

on peut admettre que la quantité d'eau varie linéairement avec le dosage, ce qui conduit à la formule suivante pour l'obtention de bétons de même consistance :

$$E = \alpha C + \beta$$

Il est bien évident que les valeurs  $\alpha$  et  $\beta$  sont fonction du type de ciment (finesse en particulier), des granulats (granulométrie, forme des grains, etc.) et de la consistance voulue.

Les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  tirées des essais de Graf sont les suivantes :  $\alpha = 0,07$  ;  $\beta = 115$  ( $E$  et  $C$  en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

D'après les « Règles concernant la composition des bétons », complément de la Norme SIA 162, les quantités d'eau à utiliser pour obtenir des bétons de même consistance sont données dans la fig. 7. Les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  tirées du graphique précédent sont les suivantes :

Ballast	Consistance	$\alpha$	$\beta$
Roulé	terre humide	0,080	130
	molle	0,088	146
Concassé	terre humide	0,104	165
	molle	0,120	177

## 9. Transport

Après le malaxage, le béton est versé sur un engin de transport. Lors du versement, les gros granulats ont tendance à rouler vers le bas ce qui détruit l'homogénéité du béton ; cet accident est plus probable

avec un béton trop sec, de faible dosage et dont le rapport gravier/sable est élevé. Au cours du transport, le béton est soumis à des vibrations qui peuvent provoquer une certaine ségrégation : les cailloux descendent tandis que le mortier, plus léger, remonte à la surface ; pour éviter ce phénomène, il ne faut pas mettre trop d'eau, ni trop peu, et faire un mélange collant, donc avec un dosage en ciment suffisant.

On peut rappeler, en outre, que le temps de transport (et de stockage) doit être court pour que la mise en place et le serrage soient effectués avant le début de prise. Notons à ce sujet que le temps de prise est fonction de la température, du type et du dosage en ciment ainsi que de la quantité d'eau.

## 10. Mise en place du béton

Le béton, pour être étanche, doit être étudié de telle façon que la mise en place soit aisée. Il doit parfaitement remplir les coffrages et la granulométrie doit être telle que les plus gros grains ne risquent pas de se coincer entre les armatures, ce qui produirait des vides et entraînerait non seulement une chute de la résistance et de l'étanchéité, mais aussi un risque de corrosion.

Actuellement, la vibration est le moyen le plus courant de serrage du béton.

On peut signaler que l'efficacité de la vibration augmente avec la fréquence et l'on a tendance aujourd'hui à utiliser des vibrateurs à haute fréquence (20000 t/m

ou 333 Hz) ; ceci conduit dans certains cas à des déboires car le rayon d'action est à peu près inversement proportionnel à la fréquence.

Nous pensons que les vibrateurs dont la fréquence est de l'ordre de 100 à 200 Hz (6 à 12 000 t/m), donnent les meilleurs résultats. La solution idéale serait d'avoir des vibrateurs à fréquence variable.

Pour les bétons très mous, les bétons pompés par exemple, une vibration trop longue ou trop puissante peut être néfaste à cause de la ségrégation.

## 11. Coffrages

Les coffrages qu'on utilise pour obtenir des bétons étanches doivent remplir certaines conditions. Ils doivent être rigides car autrement il y a des risques de dislocation du béton à l'état frais. D'autre part, il faut qu'ils soient traités afin d'éviter l'absorption d'eau du béton en contact avec eux, car ce béton n'aurait pas assez d'eau pour s'hydrater convenablement. Finalement, il faut qu'ils soient étanches pour éviter, lors de la vibration, toute perte de lait de ciment ce qui conduit à la formation de nids de gravier.

## 12. Conservation

### 12.1 Humidité

Il faut que pendant un certain temps le béton soit conservé dans une atmosphère telle que l'hydratation du ciment puisse

se faire dans de bonnes conditions. Ce temps est variable et fonction même de la qualité du béton, de sa porosité en particulier. En effet, si un béton est suffisamment compact, il suffit de quelques jours de conservation dans de bonnes conditions (arrosage par exemple). Par contre, s'il est poreux (manque de ciment, mauvaise granulométrie, serrage défectueux), le départ de l'eau de gâchage est facilité et l'hydratation ne se fait pas correctement.

### 12.3 Température

On sait que lors de la prise et du durcissement du ciment, il y a un dégagement de chaleur qui provoque des élévations de température plus ou moins importantes du béton. Lorsque les masses de béton mises en place sont grandes et les coffrages isolants, ce qui va généralement de pair, l'élévation de température peut atteindre plusieurs dizaines de degrés centigrades, provoquant une expansion proportionnelle à  $\Delta T$ ; cette expansion ne provoque pas en général des dégâts graves car le béton est suffisamment mou pour supporter ces dilatations volumétriques. Par contre, lors du décoffrage, le béton a déjà atteint une résistance élevée (le durcissement est accéléré par la température); il se produit alors en surface une baisse de température très rapide, ce qui entraîne l'apparition de fissures dues au retrait thermique.

Pour lutter contre les effets de la température, on peut :

- diminuer le dosage en ciment,
- utiliser des ciments grossiers (pas des ciments HR),
- mettre en place le béton à une température faible (en utilisant par exemple de l'eau très froide et à la rigueur de la glace pilée),
- ajouter au béton un retardateur de prise.

## 13. Retrait

On a vu déjà au point précédent les effets du retrait thermique.

Il existe encore plusieurs autres types de retrait :

- le retrait intrinsèque,
- le retrait avant prise,
- le retrait après prise ou retrait hydraulique.

### 13.1 Retrait intrinsèque

Il est dû au fait que la somme des volumes absolus des composantes du béton (surtout ciment et eau) n'est pas égale au volume absolu du mélange.

Etant donné que ce retrait est faible par rapport aux autres types de retrait, nous le négligerons.

### 13.2 Retrait avant prise

C'est un retrait qui apparaît avant la prise du ciment et qui est dû à une consolidation du béton et au départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage.

Après la mise en place du béton, on voit apparaître à la surface un film d'eau qui est soit évaporé, soit réabsorbé une fois la prise terminée.

Les effets de ce retrait, qui peut être beaucoup plus grand que le retrait après prise (ou hydraulique), sont l'apparition de grandes fissures à la surface.

Pour lutter contre ce retrait, on peut par exemple augmenter le dosage en ciment ou la teneur en matières fines, ce qui peut paraître paradoxal. Ces matières fines, en effet, retiennent l'eau de gâchage.

D'après Delisle, la meilleure solution est de mettre une couverture qui empêche l'évaporation par le vent et le soleil.

### 13.3 Retrait après prise

Ce retrait est dû à un départ lent d'une partie de l'eau de gâchage.

Pour la plupart des praticiens ce retrait est la cause de tous les maux et le défaut principal du béton.

On admet en général que ce retrait dépend en grande partie du dosage en ciment et c'est la raison pour laquelle on tâche toujours de le limiter mais en réalité il n'en est rien. Il peut sembler absurde au premier abord d'affirmer que le retrait ne dépend pas du dosage en ciment mais c'est ce que nous allons essayer de démontrer, du moins pour les bétons usuels où le dosage en ciment est compris entre 200 et 500 kg/m<sup>3</sup>.

Pour faciliter la compréhension, nous ferons la distinction entre deux types d'ouvrages.

#### a) Ouvrages (ou parties d'ouvrages) enterrés

Il est bien connu, mais souvent oublié, que si un béton est conservé dans l'eau ou dans une atmosphère saturée d'eau, le retrait est pratiquement nul car il n'y a pas de possibilité de départ d'eau. En réalité, si le béton est conservé dans l'eau, on a plutôt un léger gonflement.

On en conclut donc que pour ce type d'ouvrage le dosage en ciment ne joue pas de rôle sur le retrait.

On peut signaler encore que si de petites fissures de retrait étaient apparues avant la mise en contact du béton avec la terre humide ou l'eau, elles se refermeraient dans le temps car le retrait est un phénomène réversible.

Pour ces ouvrages donc, les pertes d'étanchéité ne sont pas dues au retrait hydraulique mais plutôt à des défauts de compactage (nids de gravier), à des fissures de tassement, à des reprises de bétonnage mal soignées, à des traversées de canalisations, à des fissures préexistantes dues au retrait thermique, à une mauvaise composition du béton, etc.

#### b) Ouvrages (ou parties d'ouvrages) aériens

Pour ce type d'ouvrages le béton est conservé dans des conditions très différentes dans le temps; il subit des cycles de siccité et d'humidification en fonction des conditions atmosphériques (soleil, vent, pluie, brouillard, etc.), ce qui provoque des retraits et des gonflements.

C'est un fait que le retrait peut entraîner des fissures et par conséquent une perte d'étanchéité à plus ou moins longue échéance, mais il n'en est pas moins vrai que ce retrait est très peu influencé par le dosage en ciment.

Nous avons effectué des mesures de retrait sur des bétons de dosage en ciment différents et conservés dans les mêmes conditions: les retraits de ces bétons étaient pratiquement identiques lorsque la consistance des bétons était maintenue constante.

On en arrive à peu près au même résultat lorsqu'on se base sur les « Recommandations Internationales FIP-CEB ». En effet, selon ces « Recommandations » pour évaluer l'ordre de grandeur des déformations dues au retrait, on admet la relation suivante :

$$\varepsilon_r = \varepsilon_c K_b K_d K_p K_t$$

où :

$\varepsilon_r$  = Déformations dues au retrait.

$\varepsilon_c$  = Valeur de base du retrait en fonction de l'humidité relative.

$K_b$  = Paramètre dépendant du dosage en ciment et du rapport  $E/C$ .

$K_d$  = Paramètre dépendant des dimensions de la pièce.

$K_p$  = Paramètre dépendant du % d'armatures.

$K_t$  = Paramètre dépendant du temps.

Les valeurs du paramètre  $K_b$ , le seul qui est fonction de la composition du béton, figurent dans le graphique ci-dessous (fig. 8).

De l'examen de ce graphique, on déduit que si l'on remplace les courbes par des droites (tracées en pointillé) passant par le point ( $E/C = 0,2$ ;  $K_b = 0$ ) la valeur de  $K_b$  ne change pas ou extrêmement peu.

L'équation générale du faisceau de droites est :

$$K_b = \frac{1}{100} C (E/C - 0,2) \quad (1)$$

car elles passent toutes par le point (0,2; 0) et les pentes sont égales à  $\frac{C}{100}$ .

L'équation (1) peut donc s'écrire sous la forme :

$$K_b = \frac{1}{100} (E - 0,2 C) \quad (2)$$

Remplaçons dans cette formule la quantité d'eau  $E$ , par l'expression  $\alpha C + \beta$ ,

qui donne des bétons de même consistance (voir paragraphe 9 « Consistance »); on obtient :

$$K_b = \frac{1}{100} [\beta - (0,2 - \alpha) C]$$

Dans tous les cas examinés, on a vu que  $\alpha < 0,2$ ; il en résulte que  $0,2 - \alpha > 0$  et par conséquent, à consistance constante :

*Le retrait diminue lorsque le dosage en ciment augmente*

#### Remarques

1° Si l'on admet que pour obtenir des bétons de même consistance, il faut une quantité d'eau de la forme  $E = 0,25 C + \beta$  (dans ce cas  $\alpha > 0,2$ ) le retrait est quand même peu influencé par le dosage en ciment. En effet,

$$\Delta K_b = \frac{1}{100} \cdot 0,05 \Delta C \text{ en valeur absolue}$$

et

$$\frac{\Delta K_b}{K_b} = \frac{0,05 \Delta C}{\beta + 0,05 \Delta C} \text{ en valeur relative}$$

Si  $\Delta C = 100 \text{ kg/m}^3$  (le dosage passe par exemple de  $300$  à  $400 \text{ kg/m}^3$ ) et  $\beta = 100$  environ (valeur moyenne) on aurait :

$$\frac{\Delta K_b}{K_b} = \frac{5}{105}$$

et le retrait n'augmenterait que de 5 % pour une augmentation du dosage en ciment de 33 %.

2° L'expression  $(E - 0,2 C)$  correspond à peu de chose près à la quantité d'eau libre dans le béton, car pour hydrater le ciment complètement, il faut une quantité d'eau qui varie selon les auteurs entre 15 et 20 % du poids de ciment. Il en résulte que le retrait hydraulique serait uniquement fonction de la quantité d'eau libre.

3° Pour les dosages en ciment usuels, 200 à  $400 \text{ kg/m}^3$ , la valeur  $(0,2 - \alpha) C$  est faible par rapport à  $\beta$  quel que soit  $\alpha$ . Le coefficient  $K_b$ , et par conséquent le retrait hydraulique, est donc sensiblement égal à  $\frac{1}{100} \beta$ , c'est-à-dire constant.

## 14. Conclusions

Pour obtenir un béton étanche, il faut :

- Choisir des granulats stables, propres, de forme correcte et donnant un mélange compact.  
Nous pensons que la courbe de Fuller est, en ce qui concerne la composition granulométrique, meilleure que celle de l'EMPA, à moins d'utiliser un dosage en ciment plus élevé et de disposer d'engins de mise en place très puissants.
- Que le ciment ne soit pas trop fin. Le CPN est de ce point de vue meilleur que le CPHR.
- Que le dosage en ciment soit suffisant pour enrober tous les grains et pour remplir tous les vides. Le dosage de  $300 \text{ kg/m}^3$  pour des granulométries jusqu'à 30 mm, est un minimum. A notre avis, pour ce type de béton on devrait utiliser des dosages de 325 ou mieux  $350 \text{ kg/m}^3$  pour les parties aériennes et 375 ou  $400 \text{ kg/m}^3$  pour les parties enterrées.
- Que la quantité d'eau soit minimum mais compatible avec une bonne mise en place. Pour ceci il faut que l'affaissement au cône d'Abrams soit au moins de 2 cm.
- Si le besoin s'en fait sentir, utiliser un adjuvant réducteur d'eau ou entraîneur d'air.

## BIBLIOGRAPHIE

- A. CAQUOT : *Le rôle des matériaux inertes dans le béton*. Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France, 1937.
- J.-P. DELISLE et E. POSCHUNG : *Fissuration précoce du béton*. Revue Chantiers 7 et 8/77, Montreux.
- M. DURIEZ et J. ARRABIDE : *Nouveau traité de matériaux de construction*. Dunod Paris, 1961.
- O. GRAF, W. ALBRECHT et H. SCHÜFLER : *Die Eigenschaften des Betons*, 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin, 1960.
- R. L'HERMITE : *Idées actuelles sur la technologie du béton*. Documentation technique du bâtiment et des travaux publics, Paris, 1951.
- *Au pied du mur*. Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics, Paris, 1969.
- M. VENUAT : *Ciments et bétons*. Presses Universitaires de France, Paris, 1969.
- B. SCHLOTMANN : *Über den Einfluss der Zementleimenge auf die Betonfertigkeit*. Beton 14 (1964).
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE : *ACI Manual of concrete practice*. Detroit, 1967.
- SIA : *Règles concernant la composition des bétons*. Complément de la norme 162, 1956.
- CEB-FIP : *Recommandations internationales pour le calcul et l'exécution des ouvrages*. CEB-FIP 1970, Prague.

- Que le malaxage soit effectué soigneusement. Même avec les engins les plus perfectionnés, une minute c'est un minimum minimorum.
- Que le transport soit court ou fait avec des camions malaxeurs.
- Qu'entre l'instant du malaxage et celui de la mise en place, l'intervalle de temps soit faible afin que la prise n'ait pas commencé.
- Que la mise en place soit très soignée. On doit éviter dans la mesure du possible les reprises de bétonnage.
- Que les coffrages soient traités spécialement pour éviter l'absorption d'eau. D'autre part, ils doivent être étanches car toute perte de pâte liante entraîne la formation de nids de gravier.
- Que le béton, dès la mise en place, soit protégé par des moyens ad hoc afin d'éviter l'évaporation surtout pendant les premiers jours.

C'est seulement dans ces conditions que le béton sera imperméable... si l'on a de la chance !

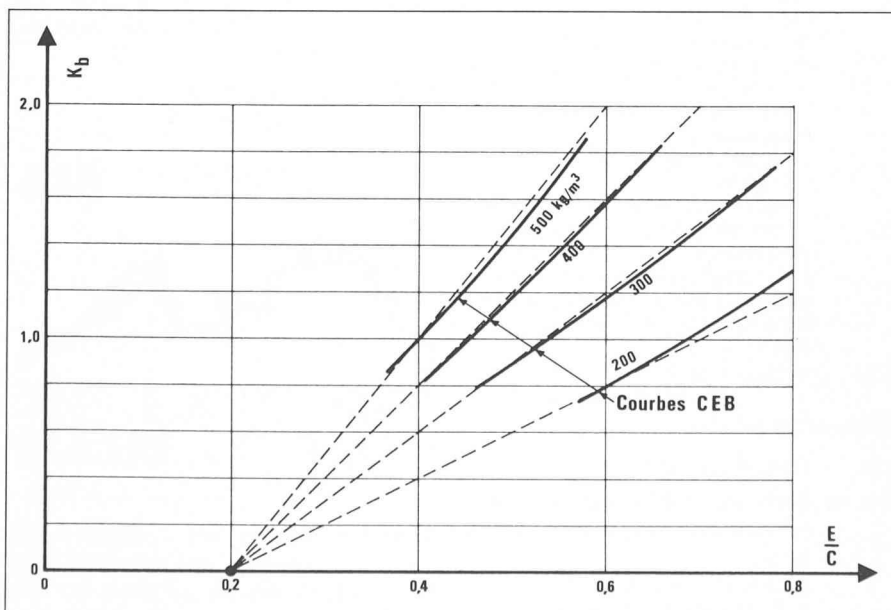


Fig. 8. — Paramètre  $K_b$  en fonction du rapport  $E/C$  pour différents dosages (d'après CEB-FIP).

Adresse de l'auteur :  
Fermin Alou, ing. civil EPFL  
Laboratoire des matériaux pierreux  
de l'EPFL  
Chemin de Bellerive 32  
1007 Lausanne