

Fig. 2. Coupe de grains de ciment enrobés dans une résine. Agrandissement 400 X (photo Furlan).

caractéristique du ciment Portland seul. Nous avons cependant mentionné la particularité de solubilité dans l'acide chlorhydrique qu'acquiert la silice SiO₂ en se combinant avec la chaux CaO lors de la fabrication du ciment. Or, il se trouve que la plupart des granulats utilisés pour la fabrication des bétons et mortiers contiennent de la silice sous une forme minérale insoluble ou très peu soluble. La silice soluble pourra donc servir de corps x pour la détermination du dosage en ciment des bétons et mortiers durcis.

Malheureusement pour la méthode, certains granulats formés à partir de roches dont la liste est donnée au tableau de la figure 5 contiennent de la silice soluble. On verra au chapitre suivant comment on peut tenir compte de la présence de silice soluble dans les granulats.

Il est également possible de déterminer le dosage en ciment en choisissant la chaux CaO comme corps x caractéristique du ciment Portland. Cette méthode ne convient toutefois pas dans notre pays, car nos granulats contiennent généralement des éléments calcaires en quantité très variable.

On pourrait utiliser à la fois les dosages en silice soluble et en chaux, mais cela conduirait à un renchérissement trop important du coût de l'analyse.

3. APPLICATION DE LA MÉTHODE

a) Calcul du dosage en ciment

Dans le cas où l'on connaît le pourcentage de silice soluble SiO₂ (ou de la chaux CaO) contenue dans le ciment et les granulats utilisés, on peut calculer le dosage en ciment d'après les résultats d'analyse au moyen de la formule suivante:

$$C = \frac{1000 m (\beta - \gamma)}{\alpha - \gamma (1 + w)} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad 1)$$

- où C: dosage en ciment (kg/m³)
- α: teneur en SiO₂ soluble (ou % CaO) du ciment (kg/kg)
- β: teneur en SiO₂ soluble (ou % CaO) du béton (kg/kg)
- γ: teneur en SiO₂ soluble (ou % CaO) des granulats (kg/kg)
- m: masse volumique apparente du béton desséché à 105 °C (kg/dm³)
- w: fraction d'eau d'hydratation exprimée par rapport au poids de ciment (kg/kg)

Cette formule est obtenue à partir des relations suivantes:

$$\begin{aligned} \alpha C + \gamma G &= 1000 \beta m_{105} & 2) \\ C + G + E_{105} &= 1000 m_{105} & 3) \\ E_{105} &= wC & 4) \end{aligned}$$

La relation 2) exprime que la silice soluble présente dans 1 m³ de béton est

égale à la somme de la silice soluble provenant du ciment et des granulats contenus dans ce m³ de béton. La relation 3) exprime que le poids de 1 m³ de béton séché à 105 °C est égal à la somme des poids de ses constituants. La relation 4) exprime que l'eau qui reste dans le béton après séchage à 105 °C est une eau d'hydratation dont la quantité est proportionnelle au poids du ciment (w vaut environ 0,15). Un exemple d'application de la formule 1) est donné à la figure 7.

b) Déroulement de l'analyse

La succession des opérations à effectuer est représentée à la figure 3.

La teneur en silice soluble du béton ou du mortier β déterminée sur un échantillon de quelques grammes de poudre obtenue par concassage et broyage de morceaux de béton ou de mortier préalablement desséchés à 105 °C. La mesure de la masse volumique apparente du béton ou du mortier m se fait par pesée hydrostatique en appliquant le principe d'Archimède. La teneur en silice soluble du ciment α et celle des granulats γ se fait sur un échantillon de matériaux qui ont été effectivement utilisés.

En étudiant la figure 3, on comprend mieux pourquoi les laboratoires demandent certains délais pour effectuer des analyses de dosage en ciment et pourquoi ces analyses ne sont pas bon marché.

4. PRÉCISION DE LA DÉTERMINATION DU DOSAGE

L'examen de la formule 1) et de la figure 3 montre que de nombreux facteurs influencent la précision du dosage en ciment obtenu:

- a) représentativité de l'échantillon de béton ou de mortier;
- b) précision de la mesure de la masse volumique m;
- c) absence de perte lors du concassage et du broyage;
- d) réduction correcte de l'échantillon broyé pour prélever l'échantillon de poudre analysé;
- e) précision de la teneur en silice soluble du béton ou du mortier β;
- f) précision de la teneur en silice du ciment α;
- g) précision de la teneur en silice des granulats γ;

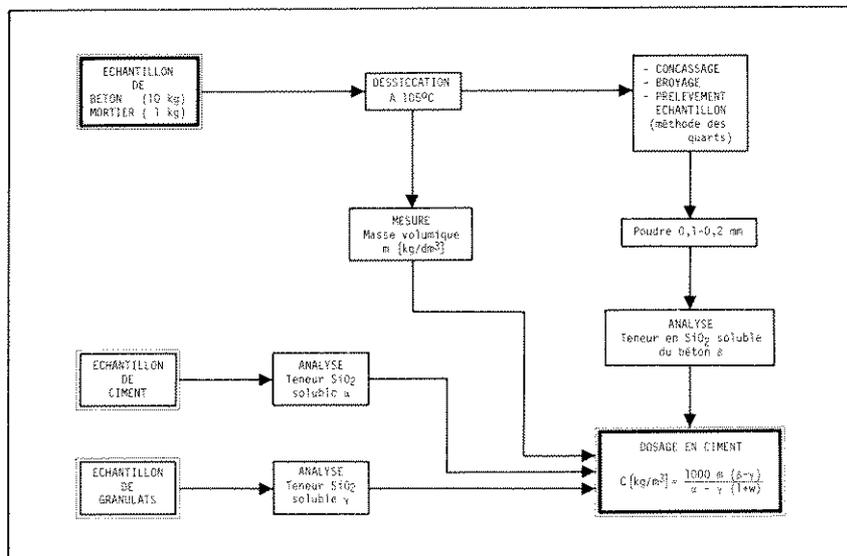


Fig. 3. Déroulement de la détermination de dosage en ciment.

h) précision de la valeur w adoptée pour l'eau d'hydratation du ciment.

Sans entrer dans trop de détails, nous allons rapidement examiner chacun des facteurs mentionnés plus haut.

a) Représentativité de l'échantillon de béton ou de mortier

La précision des déterminations de dosage en liant dépend dans une mesure importante du prélèvement et de la représentativité des échantillons.

Les échantillons de bétons et mortiers reçus pour la détermination du dosage en ciment sont parfois trop petits et de ce fait ne sont pas représentatifs de l'élément de construction d'où ils proviennent. L'article 9.15 de la norme SIA 162 spécifie qu'il est nécessaire de disposer de 5 échantillons de 1 dm³ au moins. On gardera à l'esprit que, dans une même gâchée de béton, le dosage en ciment de divers échantillons de béton frais prélevés à la sortie de la bétonnière peut varier de 10%.

b) Précision de la mesure de la masse volumique «m»

Cette mesure peut facilement être entachée d'une erreur de 0,5% lorsque le béton et le mortier sont compacts et de plus de 1% lorsqu'ils sont poreux.

La compacité d'un béton et d'un mortier peut également fortement varier d'un emplacement à l'autre en fonction du soin apporté à la mise en œuvre et des difficultés locales de mise en place.

L'adjonction d'eau et un mauvais compactage réduisent la compacité du béton et du mortier frais et diminuent de ce fait le dosage effectif en ciment.

c) Absence de pertes lors du concassage et du broyage

Un soin extrême doit être apporté pour récolter toutes les particules fines produites lors du concassage et du broyage du béton et du mortier durci.

La précision est améliorée si l'on concasse et broye une grande quantité de béton ou mortier.

d) Réduction correcte de l'échantillon de poudre analysé

La méthode des quarts donne d'excellents résultats si l'on prend soin de prendre tous les éléments fins et la poussière lors du partage des échantillons en quarts.

e) Précision de la teneur en silice soluble du béton «β»

Plusieurs méthodes de dosage de la silice soluble sont actuellement utilisées. Pour une détermination de dosage, il est important d'appliquer la même méthode pour doser la silice soluble du ciment, du béton ou mortier et des granulats, car les différentes méthodes ne solubilisent pas exactement les mêmes quantités de silice soluble.

f) Précision de la teneur en silice soluble du ciment «α»

Si l'on ne dispose pas d'échantillon du liant utilisé, on adopte une valeur moyenne de l'ordre de 20,5% pour une

teneur en silice déterminée à 20 °C, ce qui peut conduire à une erreur de ± 5%, car la teneur en silice soluble des CP courants varie entre 19% et 23%. Les CPHR ont souvent une teneur en silice soluble supérieure à celle des CP normaux. Quelques teneurs en silice soluble de ciments fabriqués en Suisse sont données dans le tableau de la figure 4.

Provenance	Teneur en SiO ₂ soluble
Fabrique 1	20,16%
Fabrique 2	19,90%
Fabrique 3	20,75%
Fabrique 4	20,82%
Fabrique 5	22,22%

Fig. 4. Teneur en silice soluble de quelques ciments fabriqués en Suisse.

g) Précision de la teneur en silice soluble des granulats «γ»

Pour les granulats usuels, la teneur en silice soluble varie entre 0 et 0,15%. Pour cette raison, lorsque l'on ne dispose pas d'échantillons de granulats, on admet que leur teneur en silice soluble est nulle ou éventuellement égale à 0,1%. Ce faisant, on obtient un résultat proche de ± 10 kg/m³ environ du dosage réel pour autant que l'on ait utilisé une valeur exacte de la teneur en silice soluble «α» du ciment et que les granulats ne soient pas composés en totalité ou en grande partie de roches décomposées par les intempéries ou contenant par nature des silicates solubles dans les acides.

Dans le tableau de la figure 5 sont indiquées quelques roches contenant par nature de la silice soluble. Il est impossible d'indiquer quelles chances on a de rencontrer ces roches dans les granulats pour béton, ni non plus en quelles proportions elles peuvent contenir de la silice soluble. Il est donc recommandé de déterminer la teneur en silice des granulats chaque fois que cela est possible, car, autrement, on risque de surestimer le dosage en ciment.

PRINCIPALES ROCHES CONTENANT DE LA SILICE SOLUBLE	
Basalte	Péridotite
Serpentine	Arkose
Syénite	Grauwacke
Andésite	Conglomérats
Granulats légers à base d'argile expansée	Grès et quartzite ferrugineux
	Gypse

Fig. 5. Principales roches susceptibles de libérer de la silice soluble.

h) Précision de w

La valeur de w varie autour de 0,15. Cette variation n'a qu'une faible influence sur les résultats.

5. QUELQUES CAS PARTICULIERS

a) Ciments spéciaux et effet du temps

La composition de certains ciments spéciaux peut varier considérablement de celle des CP. Des complications apparaissent avec les ciments pouzzolani-

ques et les ciments avec adjonction de cendres volantes. La teneur en silice soluble des bétons et mortiers confectionnés avec ces ciments peut augmenter avec l'âge du matériau mis en œuvre.

La teneur en silice soluble peut également augmenter dans certains bétons âgés où la chaux du ciment se combine avec certains granulats silicieux et rend soluble une certaine fraction de silice. La carbonatation a par contre tendance à réduire la silice soluble. Ce dernier phénomène est plus sensible pour les mortiers qui sont en général plus poreux que le béton et qui se carbonatent par conséquent plus rapidement.

b) Présence d'adjuvants

Certains adjuvants des bétons et mortiers contenant des silicates et libérant de la silice soluble peuvent fausser les résultats (il en est de même pour les adjuvants à base de sels de calcium dans le cas d'une détermination basée sur le dosage du calcium).

c) Mortiers bâtards

La détermination du dosage en liant de mortiers à la chaux hydraulique ou des mortiers bâtards (chaux hydraulique + ciment Portland) est très aléatoire et imprécise.

Le tableau de la figure 6 montre les fortes variations des teneurs en silice soluble des chaux hydrauliques fabriquées en Suisse.

Provenance ou marque	Teneur en silice soluble (SiO ₂ %)
Fabrique R	12,8
Fabrique U	9,1
Fabrique B	15,1
Fabrique V	14,9
Fabrique L	9,2
Fabrique J	13,8
Fabrique R	8,8

Fig. 6. Teneur en silice soluble des chaux hydrauliques suisses en 1974.

Si l'on n'a plus à disposition les liants utilisés, ou des renseignements précis sur leur provenance, date de fabrication ou composition chimique, il est pratiquement impossible d'effectuer une détermination quelque peu précise du dosage et de la proportion des deux liants.

6. CONCLUSIONS

De ce qui précède, on peut tirer les conclusions suivantes:

- a) Il est possible de déterminer après coup le dosage en ciment d'un béton

et d'un mortier durci. Il s'agit toutefois d'une analyse comportant plusieurs opérations, chacune entachée d'une certaine erreur. Il est important de connaître l'ordre de grandeur de la précision des résultats obtenus.

- b) Lorsque l'on ne dispose pas d'échantillons du ciment et des granulats qui ont été utilisés, il ne faut pas attendre à obtenir une précision supérieure à $\pm 10\%$ pour les dosages supérieurs à 300 kg/m^3 et de $\pm 30 \text{ kg}$ pour les dosages inférieurs à 300 kg/m^3 . Les résultats peuvent être fortement surestimés si les granulats contiennent de la silice soluble.
- c) Pour obtenir une meilleure précision, il est indispensable de disposer d'échantillons du ciment et des granulats utilisés.
- d) La détermination des dosages en ciment est une opération délicate et longue.
- e) De nombreux dégâts sont causés, non par une erreur de dosage en ciment, mais par une mauvaise mise en œuvre :
- ciment mal dispersé ;
 - ciment non hydraté ;
 - mauvaise granulométrie des agrégats ;
 - excès d'eau de gâchage ;
 - fissuration avant prise par dessiccation du mortier frais ;
 - fissuration par retrait hydraulique ;
 - etc.
- f) Si l'on prenait les précautions voulues lors de la fabrication, de la mise en place et de la cure des bétons et mortiers, il n'y aurait plus lieu d'effectuer ultérieurement autant de déterminations de dosage en ciment !

RÉFÉRENCES

- Lea, F. M., *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3e éd., Edward Arnold Ltd., London 1970.
- Minnick, L. J., *Hardened Concrete — Cement Content*. ASTM, STP 169A (1966), pp. 326-339.
- Cembureau, *A Comprehensive Method for the Chemical Analysis of Hardened Concrete*. Paris 1970.
- Kirtschig, K., *Teilvorschlag für eine Vorschrift zur nachträglichen Ermittlung der Zusammensetzung von Beton*. Zement-Kalk-Gips, No 10 (1969), pp. 477-485.
- Esenwein, P., *Über der nachträglichen Bestimmung des Zementgehaltes von*

Figure 7 : Exemple de calcul de dosage en ciment

Un laboratoire a reçu pour analyse les matériaux suivants :

- 10 kg de béton
- 5 kg de CP
- 10 kg de granulats 0/30 mm (la composition granulométrique correspond à celle utilisée lors de la confection du béton)

L'analyse chimique basée sur le dosage de la silice soluble du ciment, des granulats, du béton, a donné les résultats suivants :

SiO ₂ soluble ciment	$\alpha = 21,84 \%$
SiO ₂ soluble béton	$\beta = 3,24 \%$
SiO ₂ soluble granulats	$\gamma = 0,12 \%$

La détermination de la masse volumique apparente du béton a donné $m = 2,32 \text{ kg/dm}^3$ et on a admis $w = 0,15$; le calcul du dosage en ciment donne :

$$C = \frac{2320 (3,24 - 0,12)}{21,84 - 0,12 (1 + 0,15)} = 334 \text{ kg/m}^3$$

Si les matériaux utilisés pour la confection du béton ne sont plus à disposition, on devra faire deux hypothèses importantes :

- les granulats sont exempts de SiO₂
- la teneur en SiO₂ soluble du ciment est en moyenne égale à 20,5 % ($\alpha = 20,5 \%$). Cette valeur est souvent admise pour le CP de fabrication suisse.

En reprenant le résultat de l'analyse du béton précédent avec SiO₂ soluble béton $\beta = 3,24 \%$, on obtient :

$$C = \frac{2320 \cdot 3,24}{20,5} = 367 \text{ kg/m}^3, \text{ soit un dosage } 10 \% \text{ supérieur}$$

Cet exemple illustre les imprécisions qui peuvent apparaître lors de la détermination du dosage en ciment si l'on ne dispose plus d'échantillons des matériaux effectivement utilisés. Il faut souligner que la variation des résultats, dans le cas donné, ne dépend pas de l'imprécision de l'analyse chimique, mais provient uniquement de la connaissance que l'on a des matériaux ayant servi à la confection des bétons.

Fig. 7. Exemple de calcul de dosage en ciment.

- Betonproben. Schweizer Archiv, September 1953, pp. 279-283.
- Cetic, *Analyse des bétons durcis*. Revue des Matériaux, No 679 (1973), pp. 16-25.
- Dugniolle, E., *L'analyse des mortiers de maçonnerie*. CSTC, Revue No 3 (1975), pp. 26-30.
- Seidel, K., *Handbuch für das Zementlabor*. Bauverlag, Berlin 1964. ●