

I often say that if you can measure that of which you speak, and can express it by a number, you know something of your subject; but if you can not measure it, your knowledge is meager and unsatisfactory.

WILLIAM THOMSON, *Lord Kelvin*

1. Rétrospection

Avant la première guerre mondiale, la notion de consistance du béton frais n'était guère considérée en Europe. Le mot figure une seule fois dans un ouvrage de FERET de 1906, qui contient cependant l'exposé des expériences dont il a déduit sa formule bien connue [1]. C'est que, pratiquement, une seule consistance était usitée ou admise à l'époque, celle appelée «terre humide». Le béton à peine mouillé était damé à la main, par la chute de dames pesantes. Ce n'est guère qu'après la fin de cette guerre que l'on fit usage de dames pneumatiques. Le compactage par damage ne pouvait convenir que pour des bétons relativement secs et l'on ne s'était guère avisé du rôle de l'eau comme lubrifiant ou véhicule du béton frais.

Mais, après la guerre, l'Europe apprit d'Outre-Atlantique l'usage du cône d'ABRAMS et de la table à secousses, instruments de l'essai d'affaissement (*slump test*) et de l'essai d'étalement (*flow test*). Pour les laboratoires, la possibilité de mesures faisait connaître «quelque chose» de la notion de consistance. Sur les chantiers, elle s'introduisait par une sorte de révolution venue aussi d'Outre-Atlantique, le béton coulé, qui n'avait pour objet que de permettre l'emploi des tours à couler le béton.

Pendant quelques années, ces tours régnèrent sur les grands chantiers. De grands immeubles à étages multiples furent coulés de la sorte, aussi des ouvrages d'art et même des grands barrages. L'auteur a vu sur un tel chantier, au début des années 1920, les ouvriers qui étalaient le béton avec des pelles à la sortie de la goulotte de coulage enfoncés à mi-jambe dans le béton. Lorsque le réservoir de ce barrage fut rempli d'eau, la perméabilité du corps du barrage fut rendue apparente par un suintement général sur le parement aval. Après peu d'années, la situation parut assez sérieuse pour que l'on décidât de vider le réservoir afin de disposer un revêtement étanche

sur le parement amont. Au cours d'une inspection de ce parement au moyen d'une légère passerelle accrochée au garde-corps du barrage, les attaches cédèrent accidentellement et les deux personnes qui se trouvaient sur la passerelle firent une chute jusque sur le fond du réservoir. L'une d'elles, le directeur de la société d'exploitation du barrage, fut tuée. L'autre souffrit de graves fractures, mais en réchappa. C'était le Professeur BOLOMEY de l'Ecole Polytechnique de Lausanne et auteur de formules également bien connues. Il avait lui-même connu des difficultés avec le béton coulé du barrage de Barberine [2].

Entre les deux extrêmes du béton très sec et du béton très coulant, qui étaient aux limites du domaine de variation de la consistance, devait bientôt s'imposer le béton plus ou moins plastique, plus ou moins mou, selon la nature de l'ouvrage, la présence ou non d'armatures, le moyen de mise en place du béton et son procédé de compactage. Le recours en Europe à la vibration du béton, d'abord par des appareils à air comprimé, bientôt remplacés par des vibrateurs électriques, remit en honneur des consistances plastiques pas très molles. De même le transport du béton, parfois à assez grande distance et aussi en élévation verticale, par pompage ou par l'air comprimé, exigea des consistances appropriées. Il en fut de même pour la mise en place du béton sous eau, notamment par le procédé du tube immergé à niveau plein. La notion de consistance devenait ainsi très concrète par l'étendue même de sa variation. Si ce domaine peut être étudié librement sans conditions dans les laboratoires, sur les chantiers la consistance est en fait dépendante de toutes les circonstances du travail, sa nature, la présence ou non d'armatures, la confection du béton, son transport, sa mise en place et son compactage.

L'observation suivante, bien que très épisodique, met cependant bien en relief l'appropriation de la consistance aux circonstances. En Belgique, avant la première guerre mondiale, la consistance très sèche du béton frais était réglementaire pour les travaux du génie militaire et avait été employée pour les fortifications permanentes d'Anvers, de Liège et de Namur. Pour les fortifications de campagne exécutées pendant la guerre, le règlement fut maintenu, ce qui rendait impossible tout bétonnage en des endroits avancés. Les jeunes officiers chargés de la direction de ces bétonnages dangereux apprirent

par nécessité l'étendue de la notion de consistance en même temps que sa dépendance des circonstances. Car, comme le béton était malaxé et mis en place à la pelle escoupe, la quantité d'eau était naturellement limitée à celle qui permettait encore la manipulation du béton.

2. Définition de la consistance

Elle n'est pas facile. Tout d'abord parce que, du moins dans la langue française, une variété de mots crée quelque confusion. Les termes employés sont souvent en rapport avec la méthode de mesure, par exemple fluidité pour l'essai d'étalement. Ce terme est tout à fait impropre, car même le béton le plus coulant n'est pas un fluide. On se sert aussi du mot plasticité, qui n'indique après tout qu'une certaine consistance. Il y a aussi maniabilité, ouvrabilité, voire «workability». La R. I. L. E. M. a judicieusement adopté le terme consistance en français et il y a lieu de s'y tenir.

On peut définir la consistance du béton frais comme ce qui caractérise l'état de ce béton, par analogie avec la signification du mot état en physique. Compte tenu de l'hétérogénéité constitutive du béton frais, il est dans un état généralement pâteux, pouvant varier d'une pâte très sèche à peine liée à une pâte très coulante (au-delà de cet état, les éléments se séparent et ne constituent plus un béton).

Les grandeurs mesurables susceptibles de caractériser cet état pâteux relèvent de la rhéologie. Ce sont l'angle de frottement interne, la cohésion ou seuil de glissement, la viscosité. On voit aisément comment ces facteurs varient différemment entre les limites de l'état pâteux et que la définition d'un état exige en général la mesure de plusieurs de ces grandeurs. Abstraction faite de la nécessité d'opérer en un temps assez court, puisqu'il s'agit de béton frais, et du caractère assez délicat de la mesure de ces grandeurs, il est clair que la définition de l'état, c'est-à-dire de la consistance du béton frais, par plusieurs grandeurs différentes serait déjà très peu commode pour les laboratoires et ne conviendrait pas du tout pour les chantiers.

Il en est résulté qu'aussi bien pour les laboratoires que pour les chantiers, on s'est résolu à recourir à des méthodes conventionnelles qui mesurent un phénomène qui est en rapport avec la consistance et que l'on exprime par un nombre. Il reste à savoir, selon le principe de *Lord Kelvin*, si l'on connaît quelque chose du sujet. C'est le problème de la signification des mesures de consistance du béton frais.

Il existe une abondante littérature sur les méthodes et les appareils conventionnels; il n'est pas possible ni utile de la passer ici en revue. La première tentative de normalisation du *slump test* par l'A. S. T. M. date de 1922; pour le *flow test* de 1936. L'appareil de remoulage vibratoire *Vé Bé* est plus récent. La R. I. L. E. M. a entrepris récemment une normalisation de la première et de la troisième méthode. L'Institut Belge de Normalisation effectue actuellement le

même travail, mais la méthode fondamentale est celle de la table à secousses. Cette activité de normalisation, qui s'étendra probablement jusqu'à l'I. S. O., rend actuelle la question de la signification des mesures de consistance du béton frais.

3. Expériences de 1961–1962 (inédites)

Une recherche a été proposée au sujet de ce problème comme travail de diplôme de THIRION jr., d'Amay, actuellement ingénieur civil.

Les matériaux employés ont été du sable de rivière 0,15/2,4 mm, du gravier de rivière 5/15 mm ($v = 0,39$) et du concassé de porphyre 8/22 mm ($v = 0,45$). 64 bétons de compositions et de consistances différentes ont été réalisés au moyen de ces matériaux mélangés à du ciment portland normal, généralement au dosage de 350 kg de ciment par m^3 de béton, mais aussi à 300 et 400 kg de ciment par m^3 . Les compositions ont été définies en volumes absolus, selon les notations p , s , c et e de FERET, en négligeant les vides. Les composants ont varié entre les limites suivantes:

$$0,19 < p < 0,48; 0,21 < s < 0,46; 0,095 < c < 0,135;$$

$$0,17 < e < 0,27; 0,69 < \frac{p}{e} < 2,73; 0,94 < \frac{s}{e} < 2,08;$$

$$0,38 < \frac{c}{e} < 0,76; 1,19 < F_b < 2,65.$$

F_b désigne le nombre d'étalement du béton frais à la table à secousses (*flow*), conforme à la norme belge.

Les mesures de consistance ont aussi été effectuées sur les mortiers de ces bétons, en plus de 23 mortiers confectionnés dans des compositions équivalentes au moyen de ciment de haut-fourneau normal. Leur consistance F_m a été mesurée sur la table à secousses DIN pour mortiers plastiques frais. Les limites étaient les suivantes:

$$0,40 < s < 0,58; 0,13 < c < 0,24; 0,28 < e < 0,39;$$

$$1,03 < \frac{s}{e} < 2,09; 0,38 < \frac{c}{e} < 0,76; 1,16 < F_m < 2,64.$$

Toutes les mesures de consistance ont été effectuées en triple, dans un délai inférieur à une heure après le mouillage des mélanges. Les mesures aux tables à secousses ont montré une bonne reproductibilité. Aux limites d'emploi de la table à secousses pour le béton, des essais comparatifs d'affaissement ont été effectués en se servant du cône d'ABRAMS (*slump* S en cm) et aussi au moyen d'un appareil de remoulage vibratoire genre POWERS non normalisé (durée T en secondes). Les valeurs expérimentales de T étaient du même ordre que les durées *Vé Bé*.

On a trouvé entre ces mesures les relations linéaires suivantes:

$$T(\text{sec}) = 20,40 - 11,70 F_b$$

$$\text{pour } 3'' < T < 7'' \text{ ou } 1,49 > F_b > 1,15;$$

$$\text{d'où aussi } F_b = 1,745 - 0,0855 T$$

D'après cela, aux limites extrapolées, et par conséquent sujettes à caution, des deux méthodes:

$$F_b = 1, \quad T \geq 8,71 \text{ sec};$$

$$T = 0, \quad F_b \geq 1,745.$$

Pour l'affaissement:

$$S \text{ (cm)} = 15,2 F_b - 14,1; \quad F_b = 0,928 + 0,0658 S;$$

$$11 < S < 18; \quad 1,65 < F_b < 2,11.$$

4. Exploitation statistique des résultats

Par l'analyse statistique d'après la méthode des moindres carrés et la corrélation de PEARSON, effectuée par ARNOULD, assistant à l'Université, en 1963-1964, on a pu établir les relations suivantes:

- a) Pour les bétons, valeurs moyennes de F_b de 3 mesures de consistance de 64 bétons.

$$F_b = 6,105 - 1,4 \left(\frac{0,5 p + s + c}{e} \right) \quad (1)$$

- b) Pour les mortiers, valeurs moyennes F_m de 3 mesures de consistance sur 87 mortiers.

$$F_m = 5,17 - 1,54 \left(\frac{s + c}{e} \right) \quad (2)$$

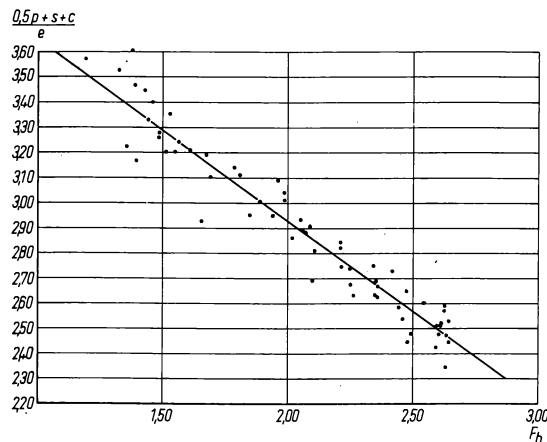


Figure 1

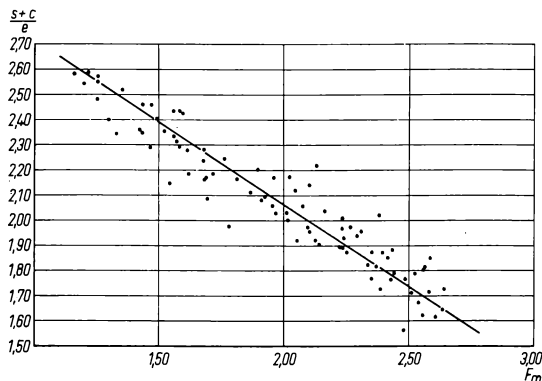


Figure 2

Le coefficient de corrélation de la formule (1) est 0,96. Il est compris entre 0,924 et 0,979 au seuil de 1%. La dispersion relative moyenne est de 3,2% (fig. 1). Le coefficient de corrélation de la formule (2) est 0,953; compris entre 0,92 et 0,973 au seuil de 1%. La dispersion relative moyenne est de 3,9% (fig. 2).

5. Vérification par sondage (1968)

L'auteur ne disposant plus actuellement d'un laboratoire a demandé à Melle le Dr. M. DZULYNSKI, qui fut sa collaboratrice, de bien vouloir mesurer les consistances du béton ci-après défini et de son mortier.

- a) Béton

gravier 5/20	1295 kg	$p = 0,489$
sable 0/2	646 kg	$s = 0,244$
ciment P. H. R.	300 kg	$c = 0,097$
eau	170 kg	$e = 0,170$
		1,000

Valeurs expérimentales: $F_b = 1,28$ et $1,27$

Valeur déduite de la formule (1): $F_b = 1,285$.

- b) Mortier

sable 0/2	1263 kg	$s = 0,477$
ciment P. H. R.	590 kg	$c = 0,190$
eau	333 kg	$e = 0,333$
		1,000

Valeurs expérimentales: $F_m = 2,07$ et $1,95$

Valeur déduite de la formule (2): $F_m = 2,09$

L'étalement du mortier a aussi été mesuré sur la table à secousses pour le béton:

1. en se servant du moule pour béton: $F_m = 2,67$;
2. en se servant du petit moule pour mortier: $F_m = 2,7$ et $2,65$.

Ces résultats expérimentaux ne concordent ni avec la formule (2), ni avec la formule (1), qui donne $F_m = 3,305$. Mais ils expliquent pourquoi ces formules ne peuvent se raccorder. Ce n'est pas en raison de la différence de dimensions et des formes des moules, mais à cause des différences des tables à secousses.

6. Examen critique des formules (1) et (2)

Ces formules ne sont proposées qu'à titre d'exemple; le paragraphe précédent permet de croire qu'elles sont satisfaisantes pour le matériel des laboratoires de l'Université de Liège. Même en admettant qu'il s'agirait d'un matériel parfaitement normalisé, il faudrait sans doute beaucoup plus d'expériences en des endroits divers pour pouvoir proposer des formules d'un usage général, dont le coefficient de corrélation pourrait être éventuellement plus faible de ce fait et la dispersion moyenne plus grande. Il serait certes intéressant de rechercher

un appareillage permettant de relier la consistance du béton à celle de son mortier.

Les formules révèlent bien les paramètres des mesures de consistance du béton frais, qui est une propriété dépendant de tous ses constituants et pas seulement de e ou de $\frac{c}{e}$. Ces derniers facteurs donnent lieu à une très faible corrélation et à une grande dispersion. Il y a lieu d'observer que les formules ont été établies sur la base d'expériences effectuées avec des matériaux d'usage courant, les granulats ayant une densité d'environ 2,65. Il n'a pas été fait usage d'adjuvants.

7. Applications de la formule (1)

L'avantage d'une telle formule est de permettre des applications simples pour orienter la composition des bétons.

a) *Données:* $c, \frac{p}{s}, F_b$

Les équations:

$$\begin{aligned} p + s + c + e &= 1, \\ F_b &= 6,105 - 1,4 \left(\frac{0,5 p + s + c}{e} \right), \\ \frac{p}{s} &= 2 \text{ (par exemple),} \end{aligned}$$

conduisent immédiatement aux résultats:

$$\begin{aligned} e &= \frac{1,4 (2 + c)}{3 (6,105 - F_b) + 2,8} \\ s &= \frac{1 - c - e}{3}, \quad p = 2s = \frac{2}{3} (1 - c - e) \end{aligned}$$

Le terme en c n'a qu'une faible influence, comme le montre le tableau suivant des valeurs de e .

	$F_b = 1$	1,5	2
(300 kg) $c = 0,097$	0,162	0,177	0,1945
(350 kg) $c = 0,113$	0,1635	0,178	0,196
(400 kg) $c = 0,129$	0,1645	0,1795	0,197
(450 kg) $c = 0,145$	0,1655	0,1805	0,1985

b) *Données:* $c, e, \frac{p}{s} = 2$ (par exemple)

On trouve $F_b = 7,038 - \frac{1,4}{e} (0,667 + 0,333 c)$

Le terme en c n'a qu'une faible influence

$$\begin{aligned} c &= 0,097 \quad F_b = 7,038 - \frac{0,979}{e} \\ c &= 0,113 \quad F_b = 7,038 - \frac{0,987}{e} \end{aligned}$$

$$c = 0,129 \quad F_b = 7,038 - \frac{0,994}{e}$$

$$c = 0,145 \quad F_b = 7,038 - \frac{1}{e}$$

$$s = \frac{1 - c - e}{3}, \quad p = \frac{2}{3} (1 - c - e).$$

c) *Données:* c, F_b et ρ = coefficient de remplissage des vides du gravier par le mortier

$$\begin{aligned} s + c + e &= \frac{\rho p v}{1 - v} = r p = 1 - p, \\ p &= \frac{1}{1 + r} \end{aligned}$$

$$\text{On obtient } e = \frac{0,7 (1 + 2r)}{(1 + r) (7,505 - F_b)}$$

Si par exemple $v = 0,40$ et $\rho = 1,50, r = 1$:

$$p = 0,50, \quad s = 0,5 - c - e, \quad e = \frac{1,05}{7,505 - F_b}$$

Pour $F_b = 1$	1,5	2
$e = 0,1615$	0,175	0,1905

d) *Données:* c, e et F_b

C'est le problème de la composition rationnelle des bétons, en vue de réaliser avec quelque approximation une certaine résistance et une certaine consistance à l'état frais. On trouve

$$p = 2,00 - \frac{(7,505 - F_b) e}{0,7}$$

$$\text{et } s = 1 - c - e - p.$$

$$\begin{aligned} \text{P. ex., } F_b &= 1,40, \quad c = 0,113 \text{ (350 kg), } e = 0,175, \\ p &= 0,473 \text{ et } s = 0,239. \end{aligned}$$

8. Sensibilité des mesures de consistance du béton frais

Dans la formule (1), les paramètres p, s, c et e ne sont pas indépendants, mais liés par la relation $p + s + c + e = 1$, en admettant que le béton frais est tout à fait compact, sans vides. Il en résulte que la formule (1) peut se mettre sous la forme

$$F_b = 7,505 - 1,4 \left(\frac{1 - 0,5 p}{e} \right) \quad (1 \text{ bis})$$

$$\text{et } dF_b = \frac{1,4}{e} \left[(1 - 0,5 p) \frac{de}{e} + 0,5 dp \right] \quad (3)$$

Les variations de F_b sont d'autant plus grandes que e est plus petit et elles sont plus sensibles aux variations de e qu'à celles de p , bien que les effets de ces dernières ne soient pas négligeables.

On peut écrire aussi

$$F_b = 6,805 - 0,7 \frac{1 + s + c}{e} \quad (1 \text{ ter}),$$

$$d'où \quad dF_b = \frac{0,7}{e} \left[(1 + s + c) \frac{de}{e} - d(s + c) \right] \quad (4)$$

Si c est invariable,

$$dF_b = \frac{0,7}{e} \left[(1 + s + c) \frac{de}{e} - ds \right] \quad (4 \text{ bis})$$

Les effets des variations de s sur F_b ne sont pas non plus négligeables; elles agissent en sens inverse de celles de p .

9. Conclusions

Sur les chantiers où l'exactitude des compositions n'est pas assurée, les mesures de consistance du béton frais ne sont pas très significatives et elles ne peuvent être considérées comme revêtant un caractère de contrôle des compositions ou de la qualité du béton. Ce sera particulièrement le cas si les granulats inertes sont dosés en volumes apparents et si leur humidité peut varier. Il peut en résulter des variations appréciables de s et de e , qui peuvent affecter sérieusement F_b d'après la formule (1 ter). Il en est de même, dans une moindre mesure, si le dosage est effectué en poids, mais sans correction pour l'humidité des granulats inertes. Tout praticien reconnaît d'emblée si un béton n'a pas la consistance requise et les

mesures ne serviront qu'à régler les contestations, sans garantir une composition correcte, car un mouillage excessif peut être compensé par un excès de sable.

Finalement, un béton répondant en permanence à des valeurs définies de résistance et de consistance à l'état frais ne pourra être obtenu, à partir de composants de qualités invariables, que par un dosage précis en poids et une correction permanente pour tenir compte de l'humidité des granulats. C'est-à-dire que le contrôle portera sur la composition et notamment sur le e total. Ceci rejoint l'opinion de feu le Professeur Roš, qui ajoutait qu'il ne faut pas définir trop strictement la consistance. D'après ce qui précède, on peut croire que si la composition est exactement réalisée, on peut s'attendre à obtenir avec une précision suffisante la consistance désirée du béton frais, dont le contrôle par la mesure peut devenir même superflu. Par contre, sur les chantiers où les compositions sont aléatoires, les mesures de consistance du béton frais n'apportent que de faibles garanties. Car ce que l'on mesure répond assez mal à l'aphorisme de *Lord Kelvin* cité en épigraphe. Cela ne fait pas connaître les éléments de ce que l'on mesure, qui seuls importent.

10. Bibliographie

- [1] FERET, R.: Etude expérimentale du ciment armé. Paris: Gauthier-Villars, 1906
- [2] SCHWEIZERISCHE TALSPERRENKOMMISSION: Messungen, Beobachtungen und Versuche an schweizerischen Talsperren. Bern, 1946