

La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances

François de LARRARD
Chef de la section Formulation et mise en œuvre des bétons
Division Bétons et ciments pour ouvrages d'art
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

François BOSC
Ohryso
Animateur du sous-groupe « Formulation »
Groupe « Connaissance et utilisation
des bétons à hautes performances »
Association française de recherches et d'essais
sur les matériaux et les constructions

Cyrille CATHERINE
CTG Technodes

Frédéric DEFLORENNE
Ciment Lafarge Viviers

RÉSUMÉ

L'article présente le résultat du travail du groupe AFREM/BHP sur la formulation des bétons à hautes performances. Il s'agit d'une remise à jour de la méthode des coulis du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) pour fournir une méthodologie permettant, pour un liant (ou mélange de liants) donné, de déterminer les doses de saturation d'un certain nombre de superplastifiants, de comparer leur efficacité respective et leur propension à conférer un comportement rhéologique stable dans le temps. Les nouveautés introduites, par rapport à l'ancienne méthode, sont les suivantes :

- béton initial pouvant varier dans une plus large gamme,
- introduction d'une partie du sable dans le coulis,
- malaxage et mesure mieux codifiés,
- méthode objective de détermination de la dose de saturation.

La méthode a fait l'objet d'essais de répétabilité et de reproductibilité (entre les six laboratoires membres du groupe) satisfaisants.

MOTS CLÉS : 32 - Béton hydraulique - Haute performance - Composition du mélange - Adjuvant - Liant - Superplastifiant - Méthode - Coulis - Étalonnage croisé - Pâte de ciment - Répétabilité - Reproductibilité.

Introduction

La formulation des bétons à hautes performances (BHP) est une opération plus complexe que celle des bétons classiques, car le nombre de paramètres à gérer est plus élevé (jusqu'à trois constituants supplémentaires). Le point critique consiste souvent à « marier » un ciment et un adjuvant superplastifiant, de façon à ce qu'ils conduisent à un mélange fluide (bien que de faible teneur en eau), et ce pendant un temps suffisant pour permettre une mise en œuvre aisée du béton.

Les opérations de formulation peuvent s'ordonner suivant la série d'étapes suivante.

- ❶ Il faut d'abord choisir les constituants en utilisant l'expérience locale disponible.
- ❷ On doit ensuite évaluer les proportions des constituants du béton ayant des chances de répondre au cahier des charges ; à ce stade, l'emploi d'un logiciel peut s'avérer utile [1].
- ❸ Le squelette granulaire doit être optimisé, par des méthodes expérimentales, empiriques ou théoriques (en employant des modèles d'empilement granulaire [2]).
- ❹ Le système liant(s)-adjuvant(s) doit être étudié.
- ❺ Enfin, le béton doit être vérifié en termes de comportement rhéologique (en utilisant, par exemple, un rhéomètre à béton [3]), puis de caractéristiques mécaniques, et, éventuellement, de durabilité.

Dans le présent article, on s'intéressera particulièrement à l'étape ④. Plus précisément, un liant (ou un mélange de liants) et plusieurs superplastifiants ayant été choisis *a priori*, on se propose d'élaborer une méthode rapide et relativement légère, permettant :

- pour chaque adjuvant, la détermination de la dose de saturation, au-delà de laquelle le produit n'a plus d'effet fluidifiant supplémentaire ;
- la comparaison de l'efficacité initiale des différents adjuvants ;
- la détection du risque de perte rapide d'ouvrabilité pour un couple et un dosage de superplastifiants donnés.

Avec une telle méthode, on peut également comparer plusieurs liants entre eux. C'est finalement une première évaluation de la composition de la pâte liante du BHP qui est ici visée, évaluation qui doit être ensuite confirmée par des essais sur béton.

La méthode des coulis [4], proposée en 1988, était une tentative de réponse à cette problématique. Après avoir rappelé son contenu, on dressera un rapide bilan de cinq années d'utilisation. Les défauts rencontrés ont conduit à une série de changements, permettant d'aboutir au nouveau mode opératoire détaillé plus loin. Des essais croisés, entrepris par les six laboratoires membres du groupe de travail, seront ensuite présentés et analysés. On conclura finalement sur la pertinence de la méthode, et sur ce qu'il est raisonnable d'en attendre.

Rappel de la méthode des coulis

La première idée sur laquelle s'appuyait la méthode des coulis est la suivante : la partie fine d'un béton concentre l'essentiel de la surface des grains, surface susceptible d'adsorber des molécules de superplastifiant. En « extrayant » du béton frais la pâte de ciment (contenant l'eau et tous les grains solides de taille inférieure à 80 μm), on obtient ainsi un béton en réduction, dont la fluidité fournira une image du comportement à l'état frais du béton initial. Cependant, comment déterminer la composition d'un coulis sensé représenter un béton de formulation inconnue ?

Il était donc nécessaire de commencer par formuler un premier béton à hautes performances, dit BHP de référence. Pour ce faire, on fixait arbitrairement le dosage en ciment à 425 kg/m^3 (qui était à l'époque un dosage usuel), on dosait largement le mélange en superplastifiant, à hauteur d'un pourcentage pondéral de 1,5 % (*), puis on réglait

(*) Extrait sec d'adjuvant/ciment seul. C'est un maximum pratique de dosage pour un superplastifiant « classique », de la famille des naphthalènes sulphonates ou des mélamines formaldéhydes.

la quantité d'eau afin d'obtenir un affaissement au cône d'Abrams de 20 cm. À ce stade, on ne s'occupait pas encore du maintien de la fluidité du béton.

Affectant une certaine partie du dosage en eau au mouillage des granulats, on était ensuite à même de calculer les proportions d'un premier coulis, dit coulis de référence. Sa fluidité était estimée par l'essai au cône de Marsh modifié. Ayant constaté que les pâtes de BHP étaient généralement plus épaisses que les coulis d'injection (pour lesquels le cône de Marsh a été conçu), on avait suggéré de n'utiliser, dans la mesure du temps d'écoulement, qu'une partie du coulis, correspondant à un volume fixé, inférieur à celui du cône. Les choix de ce volume, ainsi que du diamètre de l'ajutage du cône, étaient laissés à l'initiative de l'expérimentateur.

Ayant mesuré le temps T_0 du coulis de référence, il s'agissait alors de lui substituer un second coulis de fluidité et de volume identiques. Pour les couples liant(s)-adjuvant(s) envisagés, on parcourait les étapes suivantes :

- établissement de la courbe de saturation, donnant la variation du temps d'écoulement du coulis en fonction du dosage en superplastifiant, à rapport eau totale/liant constant ;
 - pour le dosage en superplastifiant retenu (en général, le dosage de saturation), détermination du dosage en eau conduisant au temps d'écoulement du coulis de référence ;
 - vérification du maintien de fluidité du coulis.
- Le cas échéant, un retardateur était adjoint au superplastifiant.

À ce stade, les couples liant(s)-adjuvant(s) avaient produit des mélanges comparables en termes rhéologiques. Par application de la loi de Féret généralisée, on pouvait estimer leur potentiel en termes de résistance en compression. Ces éléments suffisaient alors, en n'ayant garde d'oublier les aspects économiques, pour choisir la combinaison finale. En « injectant » ce nouveau coulis dans le squelette du BHP de référence, on obtenait finalement un béton devant, en principe, répondre au cahier des charges initial.

La méthode des coulis, dans sa forme originale, a été utilisée pour un certain nombre de grands ouvrages français : pont de Normandie, pont de Plougastel sur l'Elorn [5], pont Chateaubriand (encore appelé Arc sur la Rance [6]), centrale nucléaire de Civaux II [7], etc. Elle a reçu quelques modifications locales par certains utilisateurs [8], [9], et a pu également être adaptée au cas des bétons à air entraîné [10]. Cependant, à l'usage, quelques défauts sont apparus :

- il arrive qu'une courbe de saturation ne présente ni minimum, ni palier horizontal dans la

plage de dosage étudiée ; la détermination du dosage de saturation est alors délicate, voire sans signification ;

– parfois, des coulis de fluidité stable dans le temps donnent, une fois enrichis de granulats, des bétons perdant rapidement leur affaissement au cône.

À côté de ces défauts, certains points n'avaient pu être vérifiés, en particulier le fait de savoir si la dose de saturation sur coulis correspondait bien à celle du béton. Enfin, la méthode n'avait pas fait l'objet d'essais systématiques de répétabilité et de reproductibilité. C'est pourquoi le groupe AFREM/BHP a pris l'initiative de réexaminer chaque étape du processus, et de valider la démarche par des essais croisés inter-laboratoires.

Nouveau mode opératoire

Après prise en compte des points et remarques évoqués précédemment, le mode opératoire a été établi comme suit.

Conditions opératoires

Les conditions usuelles d'utilisation répondent aux impératifs suivants.

- Hygrométrie : > 65 %.
- Température de la salle de fabrication et de mesure : $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.
- Température de l'eau et des matériaux : $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ (sauf dans les cas où l'on désire simuler des bétonnages par temps chaud ou par temps froid).

Appareillage

- Un bécher gradué d'un volume supérieur ou égal à 500 ml pour mesurer le volume écoulé de coulis.
- Un cône de Marsh (norme **NF P 18-358**).
- Un chronomètre au dixième.
- Un thermomètre pour contrôler la température de l'eau de gâchage et du coulis à la fin de l'essai.
- Une éprouvette de 250 ou 500 ml pour mesurer l'eau.
- Une spatule en caoutchouc pour racler la paroi du bol du malaxeur.
- Une balance à 0,1 g.
- Un malaxeur aux normes CEN (EN 196-1) avec axe et palette en bon état.

Composition du coulis

Le béton de départ est formulé avec des quantités et qualités de liant(s) susceptibles de fournir la résistance recherchée, un squelette granulaire optimisé, une large dose de superplastifiant (par exemple, 1,5 % d'extrait sec par rapport au poids de ciment) et un dosage en eau ajusté pour donner la consistance recherchée (affaissement au cône d'Abrams généralement supérieur à 20 cm). La formulation du coulis est déduite de celle du béton en enlevant tous les éléments supérieurs à 2 mm, ainsi que l'eau qu'ils absorbent. On prépare 1,5 l de coulis.

Fabrication du coulis

On travaille avec du sable sec et on parcourt les étapes suivantes.

- Mettre dans le bol du malaxeur la fumée de silice, puis un poids égal d'eau.
- Malaxer à petite vitesse pendant 30 secondes.
- Introduire dans le bol le reste de l'eau avec un tiers de la dose d'adjuvant.
- Malaxer à petite vitesse pendant 15 secondes.
- Verser le ciment (et les éventuelles additions minérales autres que la fumée de silice) et déclencher le chronomètre (t_0).
- Malaxer à petite vitesse pendant 30 secondes.
- Verser le sable pendant les 30 s suivantes en laissant le malaxeur tourner à petite vitesse.
- Malaxer à grande vitesse pendant 30 secondes.
- Arrêter le malaxage pendant 30 s et racler le bol à l'aide de la spatule caoutchouc pendant les quinze premières secondes de l'arrêt.
- Introduire les deux tiers restant de l'adjuvant.
- Reprendre le malaxage à petite vitesse pendant 15 s, puis à grande vitesse pendant 1 min 45 secondes.

Mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh

- Choisir la buse de diamètre 12,5 millimètres.
- Dès la fin du cycle de malaxage, verser 1 l de coulis dans le cône (le niveau du litre sera marqué dans le cône après étalonnage avec de l'eau).
- S'assurer, avant chaque mesure, que les parois internes du cône sont humides (après rinçage à l'eau, le cône est posé à l'envers sur la paillasse pendant environ 20 secondes).
- la première mesure de l'écoulement (retrait du bouchon de la buse) se fait à $t_0 + 5\text{ min}$. On mesure le temps d'écoulement des 500 premiers millilitres, puis la température du coulis.

Cas d'un suivi de la fluidité dans le temps

Les échéances de mesures sont les suivantes : $t_0 + 5$ min, $t_0 + 15$ min, $t_0 + 30$ min, $t_0 + 45$ min, $t_0 + 60$ min. Cette période peut être étendue en fonction du cahier des charges. Entre les mesures, le coulis est laissé au repos et le bol est recouvert d'un linge humide ou d'un film plastique. Le coulis est remalaxé pendant 15 s à petite vitesse, 1 min avant la nouvelle échéance de mesure.

Nouvelle définition de la dose de saturation

Comme il l'a été dit précédemment, lors du rappel de la méthode, il est nécessaire de définir une procédure objective (même si elle est arbitraire) de détermination de la dose de saturation, si l'on veut être capable de comparer entre eux les résultats.

Remarque préliminaire

Les courbes de saturation appartiennent à l'une des deux catégories suivantes :

- elles sont décroissantes jusqu'à une valeur plancher, puis croissantes ;
- ou bien elles sont continûment décroissantes dans l'intervalle des mesures.

Le critère de minimum, choisi initialement dans la version initiale de la méthode [4], ne convient donc pas dans le second cas. On s'attache donc à définir une dose « utile », c'est-à-dire une dose au-delà de laquelle il y a peu à gagner d'un point de vue rhéologique, compte tenu des inconvénients liés au surdosage d'un superplastifiant (viscosité du béton, retard de prise, sensibilité à la température, coût).

Intérêt de raisonner en logarithme du temps

Pour un cône de géométrie fixée, et dans l'hypothèse où le coulis a un comportement newtonien, on peut écrire :

$$T = f(V_0)\eta(e/c, sp/c)$$

où

- T : le temps d'écoulement,
- V_0 : le volume de coulis placé dans le cône,
- η : la viscosité du coulis,

dépendant des rapports eau/ciment et superplastifiant/ciment (pour un coulis à base de ciment seul).

Si on se fixe un critère de pente de la courbe de saturation, et en écrivant $x = sp/c$, on a :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = f(V_0) \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

Le critère dépendra du volume du récipient. En d'autres termes, le critère appliqué à deux courbes correspondant à des volumes différents, mais obtenues avec le même coulis, donnera des doses de saturation différentes.

Au contraire, si l'on raisonne en logarithme du temps, alors :

$$\begin{aligned} \log(T) &= \log(f(V_0)) + \log(\eta) \\ \Rightarrow \frac{\partial \log(T)}{\partial x} &= \frac{\partial \log(\eta)}{\partial x} \end{aligned}$$

ce qui signifie que ce critère ne dépend que des caractéristiques intrinsèques du coulis.

En allant plus loin, et en supposant que le modèle de Farris s'applique [4], on peut écrire :

$$\eta_{\text{béton}} = \eta_{\text{coulis}} f(V_p, G/S)$$

où

- V_p : le volume de pâte liante, dans une unité de volume de béton,
- G/S : le rapport gravillon/sable.

En dérivant, il vient :

$$\frac{\partial \log(T)}{\partial x} = \frac{\partial \log(\eta_{\text{béton}})}{\partial x}$$

ce qui veut dire que le critère de pente en $\log(T)$ correspond directement à un critère de pente en logarithme de la viscosité du béton. Au passage, on retrouve que la dose de saturation sur béton est la même que sur coulis, question abordée plus loin.

Proposition d'une méthode (fig. 1)

- Tracer les points expérimentaux de la courbe de $\log(T)$, fonction du pourcentage d'extrait sec de superplastifiant par rapport à la masse de ciment, et relier ces points par une ligne brisée.
- Tracer une droite D de pente $2/5$, soit par exemple l'hypothénuse du triangle de base 1 %, et de hauteur 0,4 unité logarithmiques.
- Tracer les droites D_i , parallèles à la précédente droite D et tangentes à la ligne brisée des points expérimentaux. Les abscisses des points de tangence des droites D_i sont notées x_i .
- La dose de saturation x_s est alors :

$$x_s = \sup(x_i)$$

sous réserve que x_s ne soit pas confondu avec les bornes de l'intervalle de mesures en x .

La valeur de $2/5$ est arbitraire ; elle a été choisie parce qu'elle conduit à des doses d'adjuvant raisonnables.

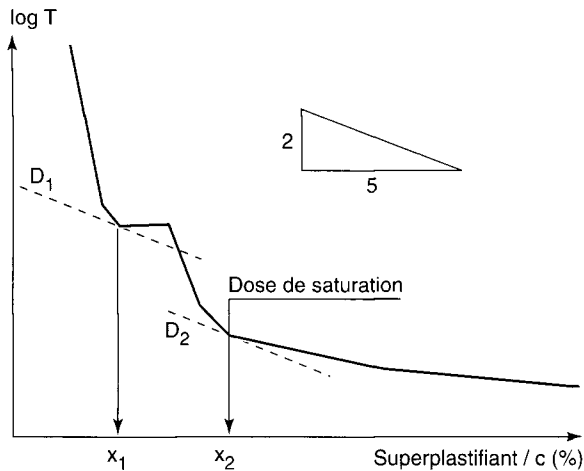


Fig. 1 - Méthode de détermination du dosage de saturation. Logarithme du temps d'écoulement en fonction du pourcentage de superplastifiant par rapport au ciment (en extrait sec).

Essais de répétabilité

TABLEAU I
Composition des coulis

Constituant	Masse
Sable normal 0/2	1 350 g
Ciment CPA CEM I 52,5 PM ES	777 g
Fumée de silice	77,7 g
Eau totale	295 g
Superplastifiant (mélamine)	variable

TABLEAU II - Résultats

Numéro	Temps (s)
1	23,7
2	25
3	24
4	24,5
5	24
6	24,5
7	24,5
8	23,8
9	23,7
10	24,3

Programmes expérimentaux de validation de la méthode

Essais de répétabilité

Le laboratoire du CTG Technodes a pratiqué une série de dix essais de coulis, tous de composition identique (tableau I). Les résultats de ces essais apparaissent dans le tableau II. Tous ces essais ont été effectués par le même expérimentateur. Des personnes différentes, utilisant le même matériel, produiraient probablement des résultats plus dispersés.

Première campagne d'essais croisés : reproductibilité de la courbe de saturation

Dans cette première campagne, une série de coulis de teneur croissante en superplastifiant, à rapport eau/ciment constant, a été fabriquée dans chaque laboratoire, avec des matériaux provenant du même lot initial (excepté le sable, qui est le « sable normal » utilisé pour les essais de ciment).

La composition des coulis était la même que celle donnée dans le tableau I. Les résultats de mesure de temps d'écoulement sont indiqués dans le tableau III.

Seconde campagne d'essais croisés : reproductibilité des essais comparatifs d'adjuvants

Enfin, des essais de temps d'écoulement en fonction du temps ont été pratiqués par les membres du groupe sur trois coulis de composition identique, à la nature (et au dosage) de superplastifiant près.

La composition des coulis et les résultats des essais apparaissent respectivement dans les tableaux IV et V.

Analyse des résultats

La mesure du temps d'écoulement est-elle répétable ?

Dans les essais de répétabilité (tableau II), la dispersion (rapport de l'écart-type à la moyenne) est de 1,8 % environ, ce qui est très faible pour une mesure rhéologique. On en déduit que le mode opératoire permet l'obtention de mesures très répétables. Au passage, on note qu'un écart supérieur à 0,5-1 s pourra être considéré comme significatif, lorsqu'il aura été obtenu par le même opérateur avec le même matériel.

Première campagne d'essais croisés

TABLEAU III - Résultats

Dosage d'extrait sec (%)	Temps d'écoulement (s)					
	Laboratoire					
	I	II	III	IV	V	VI
1,05	40,5		33,4		50,5	
1,08	38,5					
1,125	32,5			43,6	33,5	27
1,2	27,5	39,3	24,6	26,4	29	23
1,2375						
1,275	24		22,3	23	23,5	26
1,35	23,5	28,8	22,16	21,7	26	31
1,425	22,5			23,8		
1,5	21,5	20,1	22		24,5	19
1,65	21,5	19,4				

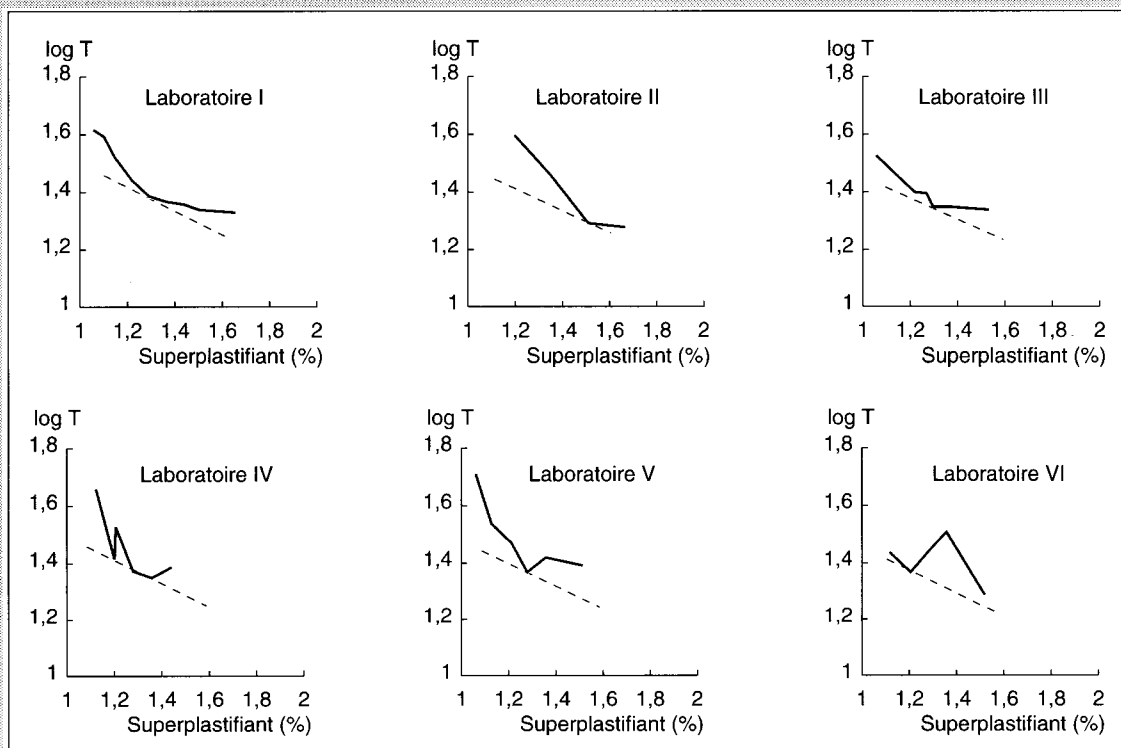


Fig. 2 - Courbes de saturation obtenues dans les différents laboratoires (mêmes conventions qu'à la figure 1).

La mesure du temps d'écoulement est-elle reproductible ?

La reproductibilité directe de la mesure du temps d'écoulement, effectuée sur un coulis préparé à partir de matériaux de même origine, mais dans des laboratoires différents et par un opérateur différent, n'est, par contre, pas très bonne. Ainsi, dans la seconde campagne d'essais croisés, la dispersion moyenne (moyenne des rapports écart-

type/moyenne (*)) est de 22,7 %, à comparer avec les 1,8 % trouvés dans les essais de répétabilité. Il semble que les conditions locales (niveau d'usure du malaxeur, rugosité du cône, facteur humain, etc.) soient responsables de cet écart. Il est donc clair qu'un temps d'écoulement, en tant que tel, n'a que peu de signification pour juger des performances d'un coulis. C'est sur un ensemble de mesures réalisées dans le même laboratoire et par le même opérateur qu'il faut raisonner.

(*) En raisonnant sur la population des résultats relatifs à une même composition de coulis, dans les six laboratoires.

Seconde campagne d'essais croisés

TABLEAU IV
Composition des coulis

Constituant	Masse
Sable normal 0/2	1 350 g
Ciment CPA CEM I 52,5 PM ES	777 g
Fumée de silice	77,7 g
Eau totale	295 g
Superplastifiants :	
1 (vinyle sulfonate)	0,65 %
2 (mélamine)	1,2 %
3 (naphtalène)	1,3 %

Les dosages de superplastifiants sont donnés en extrait sec.

TABLEAU V - Résultats

Adjuvant	Temps d'attente (min)	Temps d'écoulement (s)					
		Laboratoire					
		I	II	III	IV	V	VI
1	5	39	29,4	37,4	39,5	40	42,5
	15	46	35,7	43	45,5	52	50
	30	52	37,5	45,3	49,5	62	55
	45	60	38,1	49,4	54,6	62	61
	60	66,5	42	51,5	62	72	67,5
2	5	27	20,4	27,5	31,5	28	
	15	33	23,5	31	36,4	30	
	30	39	25,2	34,6	40,3	33	36
	45	43,5	26	35,7	42	36	40
	60	50	26,8	38	50,9	38	41,5
3	5	28	20,4	26,8	43,5	28	26
	15	38,5	26,9	32,3	73	39	33
	30	47,5	31	35,9	119	46	39
	45	55,5	32,7	39,5		57	46,5
	60	66	34,8	43,8		65	51

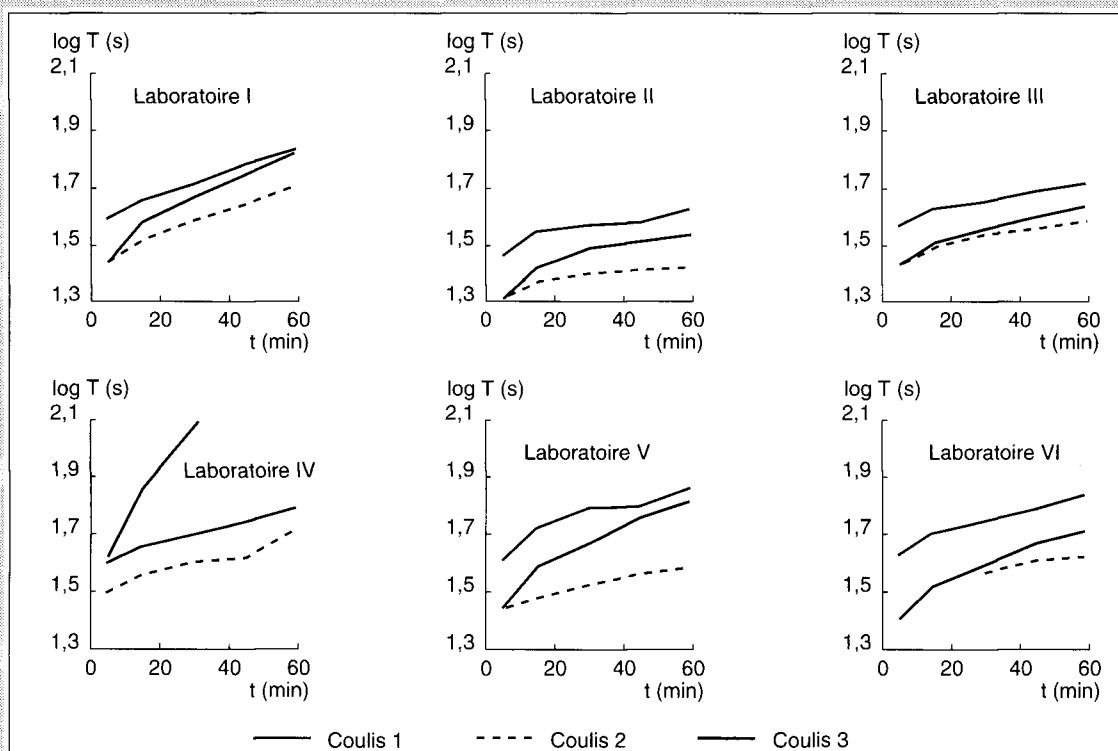


Fig. 3 - Temps d'écoulement en fonction du temps, tels que mesurés pour les trois compositions de coulis par les différents laboratoires.

Les doses de saturation sont-elles reproductibles ?

La première campagne d'essais croisés, illustrée par la figure 2, permet par contre de répondre affirmativement à cette question. Sur les six laboratoires, quatre trouvent une dose de 1,275 % de superplastifiant. Les deux laboratoires restant s'écartent peu de cette valeur. On remarque d'ailleurs que leurs courbes sont suspectes, soit par leur aspect général (laboratoire VI), soit par le faible nombre de points de mesure (laboratoire II). Au total, la valeur moyenne est de 1,3 %, pour un écart-type de 0,1 %. En pratique, pour un même liant, la gamme de variation des doses de saturation varie pratiquement de 0,5 à 1,5 %. La précision de la mesure est donc d'environ un dixième de l'étendue.

Le classement des adjuvants est-il reproductible ?

La figure 3 permet de répondre positivement. En effet, à l'exception du laboratoire IV, pour lequel l'adjuvant 3 présente un comportement anormal, tous les participants s'accordent sur les faits suivants :

– le classement entre adjuvants va du numéro 2 pour le meilleur au numéro 1 pour le moins bon

(en termes de capacité fluidifiante, et avec le liant considéré) ;

– les raidissements observés sont similaires pour les numéros 1 et 2, et plus importants pour le numéro 3.

Des essais ont été également entrepris dans le cadre de ce groupe, afin de comparer les résultats sur coulis avec des mesures rhéologiques sur béton.

Certains résultats ont été présentés par Hu [11]. Il apparaît que la dose de saturation sur coulis, mesurée selon le présent mode opératoire, est très comparable à celle obtenue sur béton en termes de seuil de cisaillement. Le classement entre adjuvants n'est pas directement transposable, car, pour avoir une image plus complète du comportement rhéologique du béton, il importe de mesurer au moins deux grandeurs (seuil de cisaillement et viscosité plastique [3], [11]). Or, les classements des adjuvants, selon ces deux propriétés, ne sont pas systématiquement corrélés. En revanche, une incompatibilité majeure entre adjuvant et liant se traduit aussi bien par un temps d'écoulement sur coulis vivement croissant que par une augmentation rapide du seuil de cisaillement du béton (résultat confirmé par Beaupré [12]).

Conclusion

On a présenté, dans cet article, la nouvelle méthode des coulis de l'AFREM, pour la formulation des bétons à hautes performances (BHP). Rappelons que cette méthode ne prétend pas traiter toutes les questions qui se posent lors de la détermination de la composition d'un BHP.

□ Dans un processus complet, qui va du choix des constituants jusqu'aux ajustements rhéologiques finaux (nécessairement sur béton), la méthode permet :

- pour un système liant(s)-adjuvant(s) donné, de déterminer la dose de saturation du superplastifiant ;
- pour un liant donné, de faire une première comparaison de l'efficacité de différents adjuvants ;
- de détecter des risques de raidissement précoce liés à une incompatibilité de nature physico-chimique entre superplastifiant et ciment.

□ Les nouveautés introduites, par rapport à l'ancienne méthode, sont les suivantes :

- une plus grande liberté est laissée à l'utilisateur pour le choix de la formule de départ (*) ;
- une partie du sable (passant à 2 mm) est introduite dans le coulis ;
- le mode opératoire de malaxage et de mesure a été modifié et fixé dans tous ses détails ;
- une définition objective de la dose de saturation a été proposée.

□ Sur ces nouvelles bases, la méthode apparaît répétable et reproductible. Il faut, cependant, garder à l'esprit qu'une fois le système liant(s)-adjuvant(s) choisi et les dosages arrêtés, il importe de vérifier le comportement rhéologique du béton avec un outil approprié [3], et de jouer sur certains paramètres de formulation (volume de pâte, pourcentage d'adjuvants et de retardateur) afin d'obtenir un béton de propriétés rhéologiques satisfaisantes.

(*) L'attention des utilisateurs est attirée sur la nécessité de partir d'une formule de béton de consistance acceptable. Si, en effet, on fixe arbitrairement le rapport eau/liant d'un coulis, et que l'on cherche ensuite à déterminer la courbe de saturation, le risque existe de voir apparaître ressuage et ségrégation, particulièrement en l'absence d'ultrafines, ce qui obérerait la validité des mesures.

— RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES —

- [1] De LARRARD F., FAU D. (1993), Le béton démystifié avec le logiciel BETONLAB, *Travaux*, mars.
- [2] SEDRAN T., De LARRARD F. (1994), RENÉ-LCPC : un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, nov.-déc., pp. 87-93.
- [3] De LARRARD F., HU C., SITZKAR J.-C., JOLY M., CLAUD F., SEDRAN T. (1994), Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides, *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, **527**, oct., pp. 17-47.
- [4] De LARRARD F., PUCH C. (1989), Formulation des bétons à hautes performances : la méthode des coulis, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **161**, mai-juin, pp. 75-83. Également dans *Les bétons à hautes performances : Caractérisation, Durabilité, Applications*. Sous la direction d'Y. Malier, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [5] LE BRIS J., REDOULEZ P., AUGUSTIN V., TORRENTI J.-M., De LARRARD F., *High-Performance Concrete at the Elorn Bridge*, ACI Fall Meeting, Session High Performance Concrete in Severe Environments, Minneapolis, SP 140-4, November, 1993.
- [6] DE CHAMPS J.-F., MONACHON P., *Une application remarquable : l'arc du pont sur la Rance*, Les Bétons à hautes performances: Caractérisation, Durabilité, Applications, op. cit.
- [7] De LARRARD F., ACKER P. (1990), *Amélioration de l'étanchéité à l'air des enceintes internes de centrales nucléaires - Intérêt d'un béton à hautes performances de formulation spécialement adaptée*, Contrat EDF/SEPTEN 347020, Rapport des Laboratoires, **OA 7**, oct.
- [8] ROLLET M., LÉVY C., CAVAILLÈS R. (1992), *Evaluation of Compatible-Superplasticizer for the Production of High-Strength Concrete*. International Conference on the Chemistry of Cements, New-Delhi, **Vol. IV**, pp. 115-121, November.
- [9] BAALBAKI M. (1990), *Façon pratique d'évaluer le dosage en superplastifiant : la détermination du point de saturation*, Séminaire sur les superplastifiants, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- [10] LESSARD M., GENDREAU M., BAALBAKI M., PIGEON M., AITCIN P.-C. (1993), Formulation d'un béton à hautes performances à air entraîné, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **188**, nov.-déc., pp. 41-52.
- [11] HU C. (1995), *Rhéologie des bétons fluides*, Études et recherches des LPC, **OA 16**, sept., 204 p.
- [12] BEAUPRE D. (1994), *Rheology of High-Performance Shotcrete*, Thèse de l'université de Colombie britannique, Vancouver, févr.

Ont participé également à ce travail les autres membres de l'Association française de recherches et d'essais sur les matériaux et les constructions, Groupe « Connaissance et utilisation des bétons à hautes performances », Sous-groupe « Formulation » : F. Garnier (INSAT/LMDC), C. Hu (LCPC), P. Jean (EDF/CEMETE), J.-C. Mašo (INSAT/LMDC), G. Peiffer (Saint-Gobain Pont-à-Mousson).

ABSTRACT

A new AFREM/HPC slurry method for the formulation of high performance concretes

F. DE LARRARD - F. BOSCH - G. CATHERINE - F. DEFLORENNE

The authors present the result of the work of the AFREM/HPC group on the formulation of high performance concretes. It concerns the updating of the LCPC grout method; the purpose is to provide a methodology for determining, for a given binder or mixture of binders, the saturation doses beyond which a certain number of superplasticizers have no effect, and comparing their respective efficacies and their propensity for conferring a stable rheological behaviour over a period of time. The innovations by comparison with the previous method are as follows: since the initial concrete can vary over a wider range, the introduction of a proportion of sand in the grout; better codified mixing and measurement; and the objective determination of the saturation dose. The method was tested for repeatability and reproducibility among the six laboratories belonging to the group, with satisfactory results.