

François DE LARRARD*
Thierry SEDRAN
*Laboratoire central des ponts et chaussées,
Bouguenais, France*

Le logiciel BétonlabPro 3

■ RÉSUMÉ

Les nouveautés introduites dans le logiciel BétonlabPro 3 par rapport à la version 2 diffusée en 2000 sont présentées. Cet outil permet d'identifier des constituants, d'alimenter une base de données et d'étudier des mélanges de diverses combinaisons des constituants pour obtenir un béton satisfaisant à un cahier des charges donné. En termes de nouveaux constituants, le logiciel traite à présent des laitiers moulus de haut-fourneau et des bétons à air entraîné. Il évalue, pour les bétons simulés, le temps nécessaire pour les malaxer, la vitesse initiale de ressuage et la teneur en alcalins, en vue de la prévention des réactions de gonflement de type alcali-réaction. Certains modèles ont été recalibrés, notamment ceux visant à prévoir les propriétés rhéologiques à l'état frais. Les nouvelles normes européennes ont également été prises en compte. Enfin, un certain nombre d'améliorations ont été apportées afin de rendre le logiciel et la méthode de formulation qui lui est associée plus faciles d'emploi.

Bétonlabpro 3 software

■ ABSTRACT

The new features introduced into the BetonlabPro 3 software package since the 2000 release of Version 2 are presented herein. This tool allows identifying components, expanding a database and examining the mixes of various combinations of components in the aim of deriving a concrete that satisfies a given set of specifications. In terms of new components, the software is now able to handle ground blast furnace slag and air-entrained concretes. It offers, for the simulated concretes, an evaluation of the necessary mixing time, initial bleeding speed and alkaline content, in order to prevent against swelling reactions of the alkali reaction type. Some models have been recalibrated, in particular those intended to predict rheological properties in the fresh state. The new European standards adopted have also been incorporated into the updated software. Lastly, a number of improvements have been provided to simplify use of the application and the associated mix design methodology.

* AUTEUR À CONTACTER :
François DE LARRARD
francois.de-larrard@lcpc.fr

INTRODUCTION

La formulation des bétons est un exercice dont la complexité croît avec le nombre de constituants disponibles, le nombre de propriétés du béton à contrôler et l'étendue possible de ces propriétés. Pour aider les praticiens à faire face à cette situation, le LCPC propose depuis 2000 un logiciel intitulé BétonlabPro 2 [1]. L'ensemble des modèles programmés dans le logiciel est présenté, discuté et justifié dans un livre qui synthétise une quinzaine d'années de recherche sur le sujet [2].

Diffusé dans la profession à soixante-dix exemplaires, le logiciel a logiquement suscité des souhaits d'amélioration, en matière notamment d'ergonomie. De plus, les recherches sur les bétons se sont

poursuivies et la prévision de nouvelles propriétés à partir de la composition des bétons est de ce fait devenue possible. Certains modèles nécessitaient également d'être recalibrés, compte tenu des nouvelles données expérimentales disponibles. Enfin, des progrès ont été également apportés dans les méthodes de caractérisation de certains constituants. C'est pourquoi il a paru utile de proposer aux utilisateurs une nouvelle version du logiciel.

NOUVEAUX CONSTITUANTS PRIS EN COMPTE

■ Intégration des laitiers moulus de haut-fourneau et des ciments au laitier dans les constituants admissibles

Les ciments au laitier sont utilisés de longue date en France et le recours à ce type d'addition devrait augmenter dans l'avenir, compte tenu de la pression environnementale tendant à réduire la quantité de clinker consommée dans les bétons courants. Pour les propriétés du béton frais, le laitier se comporte comme une poudre minérale, caractérisée par sa granularité et sa compacité en l'absence ou en présence de superplastifiant. Pour les propriétés mécaniques du béton durci, Mathias et de Larrard [3] ont montré qu'on pouvait modéliser le laitier comme un mélange de ciment Portland et de pouzzolane. Ainsi, la masse ℓ de laitier contenue dans le ciment composé sera prise en compte simultanément de deux façons :

- comme une masse $k_\ell \ell$ supplémentaire de ciment Portland ;
- comme une masse ℓ de pouzzolane (de type cendre volante silico-alumineuse), caractérisée par un coefficient pouzzolanique $K_p = a \log(t)$, où t est le temps (en jours).

Le logiciel propose un outil permettant de déterminer ces paramètres par calibration, à partir de mesures de résistance en compression de bétons au laitier.

Dans le cas des ciments au laitier, pour lesquels la phase laitier n'est pas disponible séparément, et par référence aux valeurs trouvées par Mathias [3] et résumées dans le **tableau 1**, on prendra $k_\ell = 0,53$ et $a = 0,30$. On peut noter que cette modélisation permet de calculer toutes les propriétés du béton durci prévues par le logiciel, y compris l'élévation de température en conditions adiabatiques, le retrait et le fluage. Les validations manquent cependant à ce stade, Mathias n'ayant pas étudié ces dernières propriétés dans sa recherche sur les bétons de laitier.

tableau 1
Coefficients pris en compte pour l'activité du laitier de haut-fourneau dans les ciments au laitier.

| Auteurs | | k_ℓ | a |
|--|-----------|-------------|-------------|
| Uomoto <i>et al.</i> (cités dans [3]) | | 0,571 | 0,157 |
| Wang <i>et al.</i> (cités dans [3]) | | 0,502 | 0,341 |
| Taylor <i>et al.</i> (cités dans [3]) | | 0,408 | 0,126 |
| Madej <i>et al.</i> (cités dans [3]) | | 0,210 | 0,660 |
| Brooks <i>et al.</i> (cités dans [3]) | | 0,688 | 0,218 |
| Ellis <i>et al.</i> (cités dans [3]) | | 0,411 | 0,232 |
| Douglas <i>et al.</i> (cités dans [3]) | laitier 1 | 0,571 | 0,099 |
| | laitier 2 | 0,645 | 0,521 |
| | laitier 3 | 0,623 | 0,096 |
| Mathias et de Larrard (mortier [3]) | | 0,40 | 0,59 |
| Mathias et de Larrard (bétons [3]) | | 0,77 | 0,27 |
| Moyennes | | 0,53 | 0,30 |

■ Possibilité d'entraîner de l'air dans les bétons

Lorsqu'on désire améliorer la résistance d'un béton aux cycles de gel-dégel ou qu'on souhaite stabiliser un matériau à faible dosage en liant en réduisant son ressuage, on a couramment recours à un adjuvant entraîneur d'air. Celui-ci, dosé en quantité très faible, contribue à la création d'un réseau

de fines bulles d'air lors du malaxage du matériau. L'air entraîné modifie l'ensemble des propriétés du béton.

Une étude a été réalisée au LCPC afin d'identifier l'effet de ces bulles d'air sur le comportement rhéologique du matériau [4]. Elle a permis de compléter les modèles rhéologiques précédemment utilisés, comme expliqué plus loin. On distingue dans les calculs l'air *occlus*, que l'on aurait trouvé dans le béton en l'absence d'entraîneur d'air, de l'air *entraîné*, surcroît d'air lié à la présence de l'adjuvant et correspondant à la partie fine de la granularité des bulles.

D'un point de vue pratique, le parti a été pris de demander à l'utilisateur du logiciel de fixer le volume total d'air souhaité dans le mélange frais. En effet, c'est la grandeur qui figure toujours dans les cahiers des charges des bétons à air entraîné, alors que la dose d'entraîneur d'air nécessaire pour atteindre ce volume est éminemment variable et dépend des constituants choisis ainsi que de l'outil de fabrication. Cela signifie donc qu'une formule de béton à air entraîné proposée par BétonlabPro sera toujours incomplète, à charge pour le formulateur de réaliser quelques essais de laboratoire lui permettant d'ajuster la dose d'entraîneur d'air pour l'obtention du volume d'air prescrit.

RECALIBRATION DE MODÈLES DE PRÉVISION DES PROPRIÉTÉS

■ Recalibration et extension des modèles de propriétés rhéologiques à l'état frais aux bétons à air entraîné

La prévision des propriétés rhéologiques des bétons frais est certainement un des problèmes les plus difficiles posés aux auteurs de cet article. Un premier jeu de modèles traitant successivement de la viscosité plastique, du seuil de cisaillement et de la relation entre le seuil de cisaillement et l'affaissement au cône d'Abrams avait été proposé, suite à une vaste campagne d'essais réalisée au NIST (National Institute of Standards and Technology – USA) [5, 6]. Des campagnes d'essais ultérieures ont montré que, si les modèles dans leur forme mathématique s'adaptaient bien aux nouvelles données, les valeurs numériques des coefficients pouvaient changer significativement selon le jeu de matériaux considérés. Par ailleurs, tous les formulateurs de béton savent d'expérience qu'un même béton réalisé à 6 mois d'intervalle avec les mêmes constituants peut voir ses propriétés rhéologiques évoluer très significativement. C'est pourquoi l'espoir de développer un modèle universel, permettant la prévision à coup sûr des propriétés rhéologiques des bétons à partir de leur formulation, restera encore longtemps chimérique, tant qu'on n'aura pas progressé dans la compréhension de la physico-chimie organo-minérale qui régit les forces d'interactions entre particules fines et leur degré de floculation, qu'on ne sait d'ailleurs pas mesurer.

Cependant, afin d'aider le formulateur à réaliser les moins mauvaises prévisions possibles en l'état actuel des connaissances, on a fait le choix de garder les modèles originaux, avec des valeurs des différents paramètres moyennées sur celles obtenues dans chaque étude expérimentale.

La viscosité plastique μ (en Pa.s) s'exprime ainsi par l'équation suivante :

$$\mu = \exp \left[a \left(\frac{\Phi}{\Phi^*} - b \right) \right] \quad (1)$$

où Φ est le volume de la phase solide du béton désaéré, Φ^* la compacité de cette même phase, a et b des paramètres ajustables (figure 1 et tableau 2). À noter que l'air entraîné est compté ici comme l'eau, d'où un effet fortement réducteur de la viscosité.

Le seuil de cisaillement τ_0 est prédit quant à lui par un modèle plus complexe :

$$\tau_0 = \exp \left[a_0 + \left(b_1 + b_2 \left[1 - \frac{Sp}{Sp^*} \right]^n + f \left(\frac{V_a}{V_a + V_f} \right) \right) K_f + \sum_{\text{granulats}} a_i K_i \right] \quad (2)$$

figure 1

Relations entre la viscosité plastique et la concentration relative des bétons. La loi moyenne est ajustée sur les moyennes arithmétiques fournies par les quatre lois antérieures.

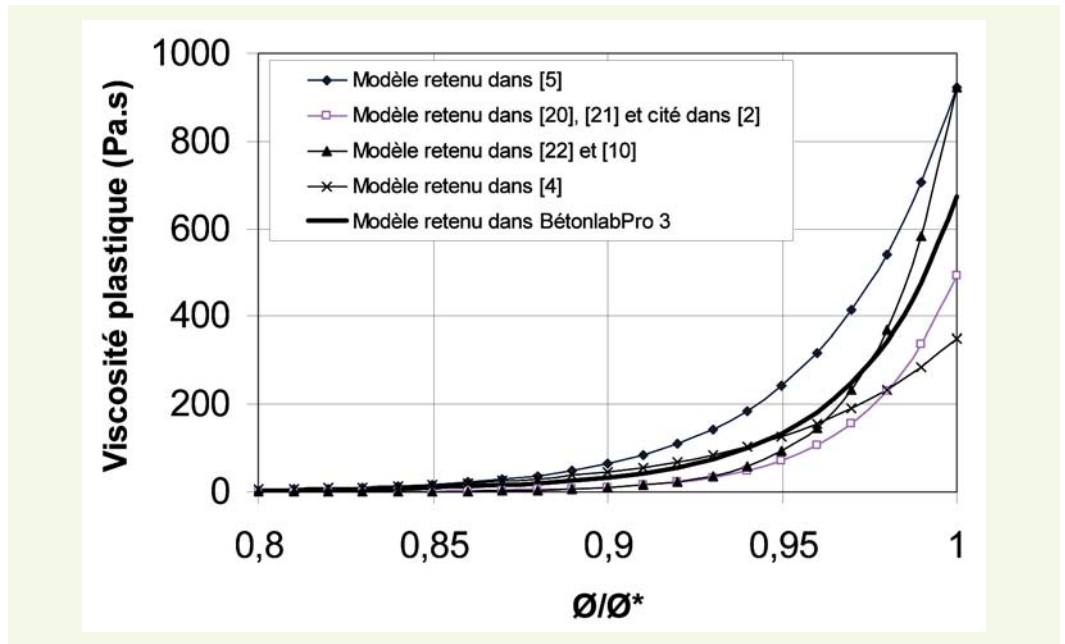


tableau 2

Paramètres de la loi reliant viscosité plastique et concentration relative des bétons – n.c. : non connu.

| Données | <i>a</i> | <i>b</i> | Erreur moyenne (Pa.s) |
|-----------------------------------|--------------|---------------|-----------------------|
| de Larrard et Ferraris [5] | 26,75 | 0,7448 | 61 |
| de Larrard <i>et al.</i> [20, 21] | 38,38 | 0,8385 | 28 |
| Données isolées (citées dans [2]) | 38,38 | 0,8385 | 53 |
| Sedran [22] | 45,88 | 0,8512 | 46 |
| Chopin [10] | 45,88 | 0,8512 | n.c. |
| Sedran [4] | 20,36 | 0,7123 | 25 |
| Modèle BétonlabPro 3 | 31,41 | 0,7942 | |

$$\text{avec } f\left(\frac{V_a}{V_a + V_f}\right) = \left(1 - \frac{Sp}{Sp^*}\right) \left(\exp\left(2,2 \frac{V_a}{V_a + V_f}\right) - 1\right) + 4,1 \frac{Sp}{Sp^*} \frac{V_a}{V_a + V_f} \quad (3)$$

dans lequel Sp est le dosage en superplastifiant, Sp^* la dose dite de saturation, V_a le volume d'air entraîné, V_f le volume de fines, K_f l'indice de serrage partiel relatif aux fines et K_i celui correspondant à la tranche granulaire i des granulats. L'ensemble des paramètres a_i (pour $i \geq 1$) est inchangé par rapport au modèle originel [2], les valeurs des autres paramètres étant précisées dans le **tableau 3**. On remarque que, selon ce modèle, l'air entraîné réduit le seuil par un effet de volume – l'incorporation d'air se traduisant par une diminution de l'ensemble des indices de serrage partiels – mais l'augmente par une friction plus forte due aux fines par augmentation du terme multiplicatif devant K_f . L'expérience montre en effet que l'entraînement d'air rend parfois les bétons plus fermes, notamment lorsqu'ils sont riches en ciment [4].

tableau 3

Paramètres de la loi reliant seuil de cisaillement et concentration relative des bétons.

| Données | a_0 | b_1 | b_2 | $b_1 + b_2$ | <i>n</i> |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| de Larrard et Ferraris [5] | 2,537 | 0,224 | 0,910 | 1,134 | 3 |
| Sedran [22] | 2,123 | – | – | 1,136 | – |
| Sedran [22] | 0,154 | 1,104 | 0,233 | 1,337 | 1 |
| Chopin [10] | 2,537 | 0,566 | 0,450 | 1,016 | 3 |
| Modèle BétonlabPro 3 | 2,330 | 0,435 | 0,700 | 1,135 | 2 |

Enfin, le calcul de l'affaissement au cône d'Abrams A , toujours prédit par la formule

$$A = c - a \frac{\tau_0}{\rho} \quad (4)$$

où ρ est la masse volumique du béton frais, nécessitant également un recalibrage, d'où les valeurs des paramètres c et a (tableau 4).

tableau 4
Paramètres de la loi reliant l'affaissement au cône d'Abrams et le seuil de cisaillement.

| Données | c | a |
|-------------------------------|------------|------------|
| Hu [23] | 300 | 270 |
| de Larrard et Ferraris [5, 6] | 331 | 347 |
| Sedran [22] | 306 | 269 |
| Sedran [22] | 268 | 269 |
| Chopin [10] | 331 | 259 |
| Banfill <i>et al.</i> [24] | 268 | 199 |
| Modèle BétonlabPro 3 | 300 | 269 |

■ Amélioration de la prévision de la résistance en compression du béton au jeune âge

Il était déjà signalé dans la version précédente du logiciel que celui-ci peinait à réaliser des prévisions fiables de résistance en compression au jeune âge (avant 7 jours). En effet, le développement de la cinétique de résistance a été décrit en faisant une hypothèse de parallélisme des courbes de résistance en fonction du temps, lorsqu'on fait varier le rapport eau/ciment. Cette hypothèse, meilleure que l'hypothèse d'affinité, plus classique mais invalidée par l'expérience, n'est tout de même pas parfaite, notamment au jeune âge où elle conduit parfois à des valeurs de résistance négatives.

Par contre, la littérature [7] ainsi que le règlement français de béton précontraint BPEL [8] propose un modèle empirique, de type hyperbolique, dont l'expérience montre qu'il est assez apte à décrire le durcissement des bétons en conditions de cure normalisées, entre 1 et 28 jours, indépendamment du type de formulation. On propose donc d'adopter un modèle du type suivant :

$$f_c(t) = \frac{At}{1+Bt} \quad \text{pour } t \geq 1 \quad (5)$$

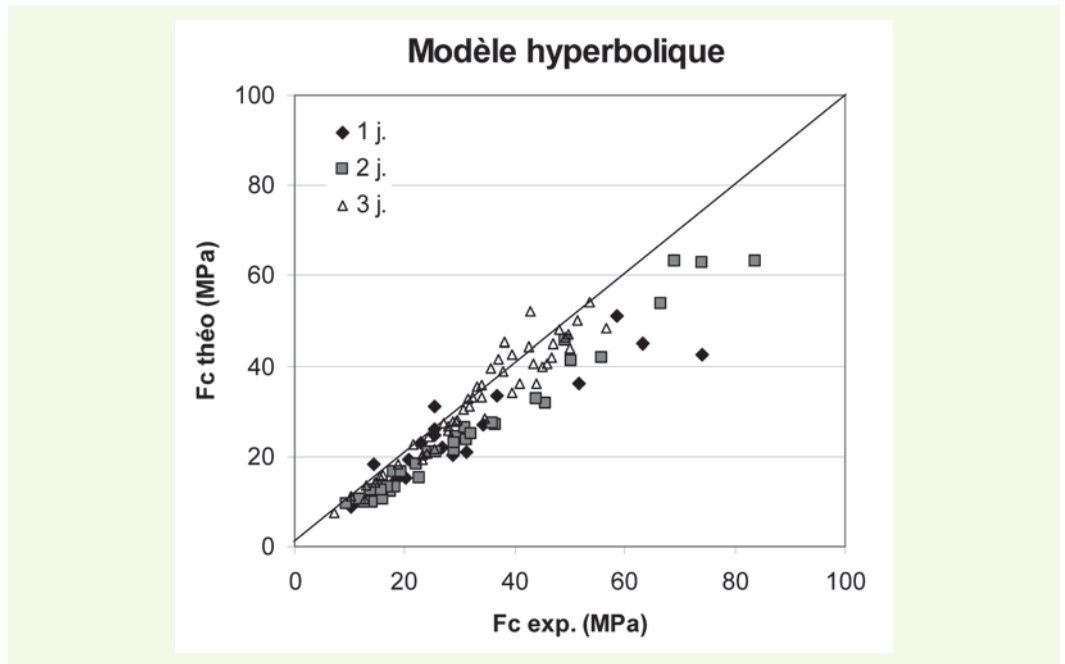
dans lequel $f_c(t)$ est la résistance en compression à l'âge t , A et B étant deux constantes ajustables. A et B sont alors déterminés à partir des prévisions de résistances à 7 et 28 jours. Il suffit ensuite d'utiliser ce modèle pour prévoir les résistances à 1 et 3 jours. Avec les données originelles, qui concernaient majoritairement des bétons de résistance moyenne ou haute à 28 jours, l'erreur moyenne sur les résistances au jeune âge est du même ordre que celle fournie par le modèle de BétonlabPro 2. L'intérêt de ce nouveau modèle est de fournir des prévisions moins hasardeuses pour les bétons du bas de la gamme, les valeurs à partir d'1 jour étant, par construction du modèle, toujours positives. Par ailleurs, pour les valeurs à 24 heures, d'une grande importance dans la pratique, le modèle place plutôt en sécurité (voir figure 2).

■ Amélioration de la prévision de l'effet de l'air sur la résistance en compression du béton

Le modèle originel de prévision de la résistance en compression adopté dans BétonlabPro 2 supposait, comme le fit Féret dans sa célèbre formule, que l'air joue marginalement le même rôle que l'eau vis-à-vis de cette propriété. Des essais systématiques menés par Mathias [9] ont montré depuis qu'une telle hypothèse conduisait à surestimer l'abaissement de résistance consécutif à l'introduction d'air

figure 2

Comparaison des valeurs expérimentales de résistance en compression aux valeurs prédites par le modèle hyperbolique, calé sur les valeurs à 7 et 28 jours, pour différents bétons. Les erreurs moyennes sont respectivement égales à 6,8 MPa (à 1 jour), 6,1 MPa (à 2 jours) et 2,7 MPa (à 3 jours). Données de Rollet (1992), de Larrard et Le Roy (1992), Malhotra (1986), Naproux (1994) et Kim et al. (1992), citées dans la référence [2].



occlus, alors qu'une division par 2 du terme air améliore nettement la précision de la formule. On s'est donc contenté de remplacer dans le modèle le terme $(v_e + v_a)$, où v_e et v_a représentent respectivement les volumes d'eau et d'air, par le terme $(v_e + 0,5 v_a)$. En toute rigueur, les coefficients qui décrivent la contribution des granulats à la résistance en compression (p et q), qui avaient été calibrés avec l'ancienne version du logiciel, devront l'être à nouveau dans BétonlabPro 3 pour garder toute leur pertinence. Cependant, l'effet de ce changement sur la valeur des coefficients est très mineur.

NOUVELLES PROPRIÉTÉS CALCULÉES POUR LES MÉLANGES SIMULÉS

■ Prédiction du temps de malaxage utile des formules de béton

En France, il est d'usage de malaxer les bétons lors de leur préparation, par opposition aux pays où on se contente de doser les constituants et de les verser dans une bétonnière portée, qui les mélange plus ou moins bien durant la phase de transport. On utilise souvent la mesure de puissance dissipée par le malaxeur (wattmètre) pour contrôler le processus : lorsque cette puissance cesse de diminuer, on en conclut généralement que la poursuite du malaxage n'apporterait rien aux qualités finales du béton et on procède à la vidange du malaxeur.

Toutefois, certains bétons, tels que les bétons à hautes performances, conduisent souvent à des temps de stabilisation du wattmètre T_s plus élevés, obérant le rendement des centrales et leur capacité à livrer les chantiers à un rythme suffisant. Dans ce contexte, la prise en compte de ce temps T_s dans l'optimisation globale du matériau se justifie, sachant qu'en réalité on dispose d'une certaine latitude pour faire durer le malaxage plus ou moins longtemps que T_s . L'estimation *a priori* de T_s peut aussi être considérée comme une première prise en compte du coût de production du béton, qui ne se limite pas au coût de ses constituants.

Sur la base d'un modèle établi par Chopin [10, 11], le temps de stabilisation du wattmètre T_s est donné en fonction du volume solide rapporté au volume total du béton frais Φ , de la compacité Φ^* de la phase solide, de la teneur en extrait sec de superplastifiant S_p , et de la valeur du même paramètre à saturation S_p^* par :

$$T_s = T_m + A \frac{\Phi}{\Phi^* - B \frac{S_p}{S_p^*}} \quad (6)$$

avec $T_m = -921$ s, $A = 1\,062$ s, $B = 0$ pour les superplastifiants d'ancienne génération (naphtalènes et mélamines sulfonés) et $B = 0,04$ pour les superplastifiants plus récents (résines vinyliques, polyphosphonates, polycarboxylates, etc.). Compte tenu du fait qu'on ne distingue pas la nature chimique de l'adjuvant dans BétonlabPro 3, on prend $B = 0,02$ pour tous les bétons.

Ce temps est cohérent avec les valeurs obtenues sur la station d'étude du malaxage du LCPC, équipée d'un malaxeur annulaire d'un mètre cube, représentatif du type de malaxeur le plus répandu dans les centrales de béton prêt à l'emploi. Le classement des formules en termes de durée de malaxage, tel que fourni par le modèle, a une portée plus générale, même si cette durée dépend bien entendu du type de malaxeur et du volume de béton fabriqué.

■ Prédiction de la vitesse initiale de ressuage

La plupart des bétons, en particulier ceux qui sont de consistance très plastique à fluide et ne comportent qu'un dosage modéré en fines, présentent après coulage un phénomène de ressuage plus ou moins marqué. Un ressuage limité peut être bénéfique car il retarde le moment où la surface supérieure du béton sera sèche et où l'évaporation, si elle n'est pas empêchée par une cure appropriée, viendra obérer la bonne hydratation de la peau du béton et provoquer des tractions superficielles pouvant aboutir à des fissures de retrait plastique. Par contre, un ressuage excessif dégrade l'ensemble des propriétés mécaniques du béton durci et met à mal l'esthétique des parements. Il peut être également à l'origine de cassures de béton frais, c'est-à-dire de fissures apparaissant au bout de quelques heures au droit des lits supérieurs d'armatures horizontales, quand celles-ci sont fixées de façon rigide alors que le béton environnant présente un tassement.

Le ressuage peut être diffus ou, dans les cas les plus sévères, localisé. Josserand a étudié le premier phénomène et a proposé un modèle de prédiction de la vitesse initiale de ressuage en enrichissant le modèle classique de Kozeny-Carman [12, 13]. Le contrôle de ce paramètre est d'un grand intérêt en formulation des bétons, en particulier pour les bétons de bâtiment, dans lesquels c'est parfois la nécessité d'un ressuage limité qui justifie techniquement le dosage en liant.

La vitesse initiale de ressuage V_{IR} , indépendante de la hauteur de la levée de béton, est donnée par l'expression :

$$V_{IR} = K \cdot [\Phi \cdot (d_s - 1) - \Psi] \quad (7)$$

où K est la perméabilité du béton, Φ sa compacité, d_s la densité moyenne des grains solides et Ψ la teneur en air du béton frais. La perméabilité est prédite par la formule suivante :

$$K = \frac{\rho_w \cdot g}{\eta_w} \cdot \frac{\left(1 - \Psi - \sum_i \bar{\alpha}_i \cdot \Phi_i\right)^3}{k_c \cdot (\Phi \cdot S_b)^2} \quad (8)$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, η_w la viscosité de l'eau, k_c la constante de Kozeny (prise égale à 5) et S_b la surface volumique du squelette granulaire. Φ_i est le volume partiel des différentes fractions granulaires i et $\bar{\alpha}_i$ un coefficient majorateur de l'effet de la classe granulaire i sur l'écoulement de l'eau dans le béton frais. Ce coefficient a été calibré pour différents matériaux par Josserand [12, 13]. Le **tableau 5** propose des valeurs standards, moyennes de celles obtenues dans les deux références précédentes. En l'absence de mesures spécifiques, on a admis que le laitier avait le même rôle qu'un filler, compte tenu du fait que les deux types de matériaux sont obtenus par broyage et peuvent être considérés, en première approximation, comme chimiquement inertes dans le béton frais. De même, la fumée de silice a été assimilée à une cendre volante, sachant que sa grande surface spécifique, qui contribuera dans le modèle au terme S_b , lui confère un rôle majeur de réducteur de ressuage.

tableau 5
Valeurs de α_i pour différents constituants du béton, dans le modèle permettant l'évaluation de la vitesse initiale de ressuage.

| | |
|-------------------------------------|------|
| Granulats | 1,09 |
| Ciment Portland | 1,46 |
| Cendres volantes et fumée de silice | 1,18 |
| Fillers | 1,12 |
| Laitiers | 1,12 |

■ Calcul du bilan des alcalins

Les recommandations du LCPC pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction [14] demandent, dans certains cas, le calcul de la masse totale d'alcalins libérables (ou actifs) par mètre cube de béton. L'acceptation de la formule passe par un critère portant sur la valeur moyenne T_m et par un critère complémentaire portant sur la valeur maximale T_{max} . Ces deux ratios sont calculés par cumul des apports de chaque constituant. Les fiches relatives aux constituants de BétonlabPro 3 incluent par conséquent une case pour les valeurs moyennes et maximales d'alcalins actifs. L'eau d'ajout pouvant apporter une quantité non négligeable d'alcalins à la formule de béton, l'utilisateur aura la possibilité de tenir compte de cette source d'alcalins lorsqu'il utilisera le logiciel.

PRISE EN COMPTE DE L'ÉVOLUTION DES NORMES

Depuis la parution de la version 2 de BétonlabPro, le paysage normatif français a connu de profondes modifications, essentiellement liées à l'arrivée des normes européennes en substitution des anciennes normes nationales. Les références aux normes, présentes dans l'aide en ligne, ont été ainsi mises à jour.

■ Dimensions et types de tamis

Les tailles des tamis européens ne correspondent pas toujours à la série de Renard, traditionnellement utilisée en France, dans laquelle les tamis sont en progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$. Les tamis européens sont pour une part tissés (NF ISO 3310-1), pour une autre perforés (NF ISO 3310-2). Ils appartiennent à une série de raison $\sqrt[20]{10}$ (dont la série de Renard est donc un sous-ensemble) comme indiqué dans la norme EN 933-2 et repris dans les normes produits EN 13242 et EN 12620). Le nouveau logiciel intègre donc la liste complète des tailles de tamis (tableau 6). Rappelons que, lors de l'introduction d'un matériau dans le logiciel, l'utilisateur n'est pas obligé de donner le passant à toutes les tailles de tamis proposées ; seules les tailles extrêmes de l'étendue granulaire, égales à 0 et 100 % respectivement, sont indispensables pour les calculs

tableau 6
Dimension des tamis prévus dans BétonlabPro 3. En grisé, série de Renard.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|
| ... | 1 | 1,12 | 1,25 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,24 | 2,50 | 2,80 | 3,15 | 3,55 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,6 | 6,3 | 7,1 | 8,0 | 9,0 | 10 | ... |
|-----|---|------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|

Signalons également que, pour les classes grossières, les nouveaux tamis de référence sont fabriqués par perforation de tôles, au contraire des anciens tamis dont les mailles étaient tissées. Il n'y a pas de correspondance directe, pour un matériau donné, entre les granularités obtenues sur les anciens et les nouveaux tamis. En toute rigueur, il faudrait s'abstenir de reprendre sous BétonlabPro 3 une granularité de matériau générée dans l'ancienne version, selon une série de tamis tissés. En pratique, l'effet de cette assimilation sur la précision des modèles est négligeable.

■ Norme béton NF EN 206

L'ancienne norme NF P 18-305 a été remplacée par la norme NF EN 206. Dans le logiciel, il en résulte quelques changements mineurs au niveau de la dénomination des classes d'environnement et du calcul du liant équivalent. Rappelons que le logiciel calcule ce dosage, ainsi que le rapport eau/liant équivalent ; ce sont les deux principaux paramètres à partir desquels on formule les prescriptions liées à la durabilité.

AMÉLIORATIONS DE NATURE ERGONOMIQUE

■ Définition du sable en une seule coupure par défaut

Dans la version précédente du logiciel, il était proposé aux utilisateurs, lors de la caractérisation d'un sable, d'effectuer des mesures de compacité sur des coupures relativement étroites et d'introduire ces mesures dans le logiciel, celui-ci en déduisant les valeurs de compacité propre virtuelle aux différents étages de la granulométrie. Il a été montré depuis que ce raffinement était superflu, compte tenu de la précision des calculs de compacité [15]. Actuellement, une seule mesure de compacité, sur le sable débarrassé de ses fines, est requise pour la définition de la fiche BétonlabPro 3 correspondante.

■ Aide à la spécification d'une formule lors de l'optimisation

Pour la détermination d'une formule de béton, on recommandait dans la version précédente de commencer par optimiser le squelette granulaire, à composition et volume de pâte fixés, puis, une fois le squelette optimal trouvé, de figer ce dernier pour s'intéresser aux constituants de la pâte. Cette démarche numérique correspondait à la démarche expérimentale suggérée par Baron et Lesage dans leur méthode de composition des bétons [16]. Ceci passait par l'introduction manuelle des différents dosages de la formule dans le module d'optimisation, qui pouvait apparaître fastidieuse pour l'utilisateur. Il est à présent prévu deux boutons dans ce module :

- un bouton « pâte constante », qui recopie dans la fenêtre du solveur la composition de la pâte et impose aux bétons simulés de conserver ces valeurs ;
- un bouton « granulat constant », qui fige les pourcentages des différentes fractions granulaires lors de l'optimisation suivante.

Ces boutons sont de nature à faciliter l'utilisation du logiciel, en particulier dans un cadre pédagogique.

■ Affichage de la compacité des formules

La compacité du béton frais est un paramètre qui était calculé par le logiciel, mais non affiché, ce qui pouvait être gênant dans certaines circonstances, notamment lorsqu'on souhaitait utiliser le logiciel pour optimiser des mélanges granulaires secs ou des matériaux compactés.

■ Affichage de g^*

La compacité du squelette formé par les éléments supérieurs à 80μ des granulats composant un béton, calculée pour un indice de serrage de 9, est notée g^* . Cette valeur intervient en particulier dans le calcul de l'épaisseur maximale de pâte et des modules élastiques instantané et différé [2]. Elle est à présent disponible pour l'utilisateur, pour d'éventuels besoins de recherche.

■ Conservation des gâchées saisies lors des opérations de calibration

Le logiciel utilise un certain nombre de paramètres relatifs à certains constituants (pour les granulats, coefficient p d'adhérence et coefficient q d'effê plafond ; pour les pouzzolanes, coefficient d'activité K_p ; pour les laitiers, coefficient d'équivalence cimentaire k_c et coefficient pouzzolanique a , déterminés par calibration sur des résultats d'essais). Jusqu'à présent, l'utilisateur devait entrer les compositions des gâchées et leurs valeurs de résistance, suite à quoi le logiciel calculait les paramètres, mais sans conserver les données expérimentales. À présent, l'utilisateur aura la possibilité de sauvegarder ces données sous la forme de fichiers dont l'extension précise la nature (.cag pour les granulats, .cal pour les laitiers de haut-fourneau, et.cap pour les pouzzolanes). Ceci évitera à l'occasion un travail fastidieux de nouvelle saisie, tout en améliorant la traçabilité dans l'utilisation du logiciel.

■ Équivalence des points et des virgules comme séparateurs décimaux

Suivant la configuration du système d'exploitation, les ordinateurs n'admettent en général qu'une option à la fois, parmi les deux possibilités d'entrer un séparateur décimal, lequel, rappelons-le, est en principe la virgule en France, et le point dans les pays anglo-saxons. La nouvelle version de BétonlabPro 3 admet indifféremment l'un ou l'autre des caractères, ce qui facilite l'entrée de valeurs décimales.

ENRICHISSEMENTS DE L'AIDE EN LIGNE

■ Mode opératoire LPC pour la mesure de la compacité des granulats

L'ancienne version du logiciel proposait une méthode de mesure de la compacité des fractions granulaires, qui reposait sur l'utilisation d'une table vibrante. La difficulté à imposer des caractéristiques de vibration reproductibles a conduit à remplacer la table vibrante par une table à choc. Le nouveau mode opératoire, publié dans la série des Méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées (LPC) [17], a été inclus dans l'aide en ligne.

■ Technique alternative pour la mesure de la demande en eau des poudres

Dans BétonlabPro 2, l'utilisateur appréciait la demande en eau des poudres au travers d'un essai spécifique consistant à rechercher la quantité d'eau permettant de passer d'un état de type « terre humide » à celui d'une pâte lisse. Cet essai, bien que simple, s'est avéré peu objectif, et parfois difficile à mettre en œuvre avec certaines poudres pour lesquelles la transition entre les deux états n'était pas franche.

Lecomte *et al.* [18] ont récemment proposé une nouvelle méthode moins subjective, fondée sur la notion de consistance normale décrite dans l'EN 196-3. Une campagne d'essais [19] a permis de valider la cohérence des deux méthodes entre elles et de confirmer que l'indice de serrage associé à cet essai est égal à 4,8. Ce nouvel essai est donc proposé comme essai alternatif dans l'aide en ligne de BétonlabPro 3.

■ Généralités sur les concepts de maniabilité

Il est apparu utile, à l'attention des praticiens, de mieux expliquer les différents concepts liés au comportement du béton frais : l'indice de serrage pour l'énergie de mise en place, le seuil de cisaillement et la viscosité plastique pour la résistance au cisaillement, et l'affaissement au cône d'Abrams comme mesure empirique liée au seuil.

CONCLUSION

La version 3 du logiciel BétonlabPro 3 intègre le retour d'expérience de ses usagers, dans le but :

- de faciliter l'utilisation du logiciel, en progressant sur sa simplicité d'emploi et sur l'aide en ligne ;
- de faciliter l'opération de formulation elle-même, notamment par la simplification des essais de caractérisation des constituants. En effet, par rapport aux méthodes traditionnelles, l'utilisation de BétonlabPro conduit à un nombre réduit de gâchées d'essai, mais à davantage de mesures sur les constituants. Encore faut-il noter que les mesures demandées ne sont pas toutes nécessaires, suivant la liste des propriétés du béton que l'utilisateur cherche à contrôler. Le logiciel indique simplement à l'utilisateur celles de ses propriétés qu'il est en mesure de calculer, suivant les renseignements dont il dispose. Par ailleurs, le fait de mettre l'accent sur la caractérisation des constituants conduit l'utilisateur à construire et à enrichir une base de données qui s'avérera très utile pour la mise au point d'autres formules de béton. Ces grandeurs peuvent aussi servir de base à des échanges d'information entre utilisateurs ou à des relations clients-fournisseurs ;
- d'étendre le domaine d'application du logiciel, qui s'applique à présent aux bétons à air entraîné et aux bétons de laitier ;

- de réduire encore le nombre d'essais, du fait d'une meilleure prévision des propriétés du béton, notamment à l'état frais ;
- d'améliorer la qualité des formules de béton produites par le nombre étendu des propriétés prises en compte dans l'optimisation. Dans ce cadre, le contrôle du ressuage du béton est certainement un progrès significatif pour les bétons courants.

Dans le but d'étendre l'utilisation de ce logiciel, le LCPC a décidé de distribuer une version allégée intitulée BétonlabFree [25], en téléchargement gratuit sur son site. Ce produit permet de manipuler les grandeurs les plus courantes des bétons, en simulant les propriétés et en recherchant, manuellement, le meilleur béton satisfaisant à un cahier des charges.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 SEDRAN T., DE LARRARD F., *BétonlabPro 2 – Logiciel de formulation de bétons – Version exécutable sous Windows*, logiciel sur CD ROM avec aide en ligne, Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, juin 2000.
- 2 DE LARRARD F., *Structures granulaires et formulation des bétons*, traduit de l'anglais par André Lecomte, ERLPC, série Ouvrage d'Art, OA34, avril 2000, 414 pages.
- 3 MATHIAS V., DE LARRARD F., Prévision des résistances en compression des bétons au laitier, *Revue Française de Génie Civil*, 2002, Vol. 6, 4, pp. 545-562.
- 4 SEDRAN T., *Effet de l'air entraîné sur le comportement rhéologique du béton frais*, rapport interne LCPC, mars 2005.
- 5 DE LARRARD F., FERRARIS C.F., Rhéologie du béton frais remanié. I : Plan expérimental et dépouillement des résultats, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 1998, 213, pp. 73-89.
- 6 DE LARRARD F., FERRARIS C.F., Rhéologie du béton frais remanié. II : Relations entre composition et paramètres rhéologiques, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 1998, 214, pp. 69-79.
- 7 POPOVIC S., *Strength and related properties of concrete. A quantitative approach*, John Wiley and Sons, 1998, 537 pages.
- 8 *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états-limites*, BPEL 91, 1991, Fascicule N° 62, titre I – section II.
- 9 MATHIAS V., *Recyclage des fraisats d'enrobés dans les bétons hydrauliques routiers*, Thèse de doctorat de l'École centrale et de l'université de Nantes, ERLPC, série Routes, CR38, novembre 2005.
- 10 CHOPIN D., *Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants. Optimisation du temps de fabrication*, Thèse de doctorat de l'École centrale et de l'université de Nantes, ERLPC, série Ouvrage d'Art, OA41, juin 2003, 206 pages.
- 11 CHOPIN D., DE LARRARD F., CAZACLIU B., Why do SCC and HPC require a longer mixing time ?, *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, pp. 2237-2243.
- 12 JOSSELAND L., *Ressuage des bétons hydrauliques*, Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, octobre 2002, 211 pages.
- 13 JOSSELAND L., ILDEFONSE J.-P., DE LARRARD F., Perméabilité à l'eau des suspensions granulaires. Application au ressuage du béton frais, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 2003, 241, pp. 61-70.
- 14 *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*, LCPC, juin 1994, 51 pages.
- 15 DE LARRARD F., LEDÉE V., SEDRAN T., BROCHU F., DUCASSOU J.-B., Nouvel essai de mesure de compacité des fractions granulaires, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 2003, 246-247, pp. 101-116.
- 16 BARON J., LESAGE R., *La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier*, Rapport de Recherche des Laboratoires des ponts et chaussées, décembre 1976, 64.
- 17 LEDÉE V., DE LARRARD F., SEDRAN T., BROCHU F., *Essai de compacité des fractions granulaires – Mode opératoire*, Méthode d'essai des Laboratoires des ponts et chaussées, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, juillet 2004, 61.
- 18 LECOMTE A., MECHLING J.-M., DILIBERTO-JEANNOT C., *Indice de serrage des pâtes cimentaires de consistance normale* www-lmdc.insa-toulouse.fr/RF2B/Actes-RF2B-2006/ActesRF2B2006.htm
- 19 SEDRAN T., DE LARRARD F., LE GUEN L., Détermination de la compacité des ciments et additions minérales à l'aiguille de Vicat, Note technique, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 2007, 270-271, pp. xx-xx.
- 20 DE LARRARD F., BELLOC A., *Formulations de référence. I : Composition des bétons et mode de fabrication*, Rapport du projet national BHP 2000, Paris, mai 1996, 5 pages.
- 21 DE LARRARD F., BELLOC A., BOULAY D., KAPLAN D., RENWEZ S., SEDRAN T., *Formulations de référence. II : Propriétés mécaniques jusqu'à l'âge de 90 jours*, Rapport du projet national BHP 2000, Paris, décembre 1996, 15 pages.
- 22 SEDRAN T., *Rhéologie et rhéométrie des bétons fluides. Application à la formulation des bétons autonivelants*, Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, mars 1999.
- 23 HU C., Rhéologie des bétons fluides, ERLPC, OA16, 1995, 203 pages.
- 24 BANFILL P., BEAUPRE D., CHAPDELAIN F., DE LARRARD F., DOMONE P., NACHBAUR L., SEDRAN T., WALLEVIK O., WALLEVIK J. E., *Comparison of concrete rheometers : International Tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000*, C.F. Ferraris and L.E. Brower, editors, NISTIR 6819, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, September 2001.
- 25 SEDRAN T., DE LARRARD F., *BétonlabFree – Logiciel d'aide à la formulation des bétons*, version libre simplifiée de BétonlabPro, prochainement téléchargeable sur <http://www.lcpc.fr/betonlabpro/>