

CAHIERS DU CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT * N° 76

4, AVENUE DU RECTEUR-POINCARÉ, PARIS XVI^e — TÉL. 288-81-80

OCTOBRE 1965 — CAHIER 647

compte rendu
des études et recherches de l'

AEPB

ASSOCIATION POUR L'EMPLOI DES PLASTIQUES DANS LE BATIMENT

COMPTE RENDU
DES JOURNÉES DES PLASTIQUES DANS LE BATIMENT
(21 - 22 - 23 avril 1965)

THÈME II ÉLÉMENTS DU BATIMENT OU INTERVIENNENT LES PLASTIQUES

BÉTONS DE PLASTIQUES ET COFFRAGES

● Bétons de plastiques (R. BARES).....	1
● Les bétons de furane et leurs applications (R. BARES et J. NAVRATIL).....	9
● Béton d'urée-formol modifié et charges renforçantes (L. RECHNER et J.-C. BERTIER)	17
● Bétons synthétiques à base de résine polyesters et époxydes (R. CIRODDE)	26
● Le béton à liant plastique peut-il être employé pour le gros œuvre du bâtiment (H. POLLET)	29
● Utilisation des matières plastiques dans le coffrage et le moulage du béton et du ciment (J. GUILBAUT DE NANÇAY).	32
● Coffrage à béton en polyester insaturé (Dr NONNENKAMP).....	36

Les rapports généraux de ces journées ont été publiés dans les Cahiers du C. S. T. B., livraison 75, cahier 640, août 1965.

LES BÉTONS DE FURANE ET LEURS APPLICATIONS

R. Bares et J. Navrátil

Institut de mécanique théorique et appliquée, Prague.

Dans de précédents rapports, [1], [2], [3], [4], l'auteur a déjà traité des propriétés du béton de plastique avec liant de résine de furol-fural. Dans le présent article, il se propose d'étudier d'autres questions encore, notamment celle de l'influence du milieu au cours du durcissement et après le durcissement et de démontrer, en vertu de lois semi-empiriques déduites par lui, les possibilités d'un béton de furol-fural (1) (2) d'une certaine résistance. Il sera montré enfin quelques modes d'application de ces bétons. Dans toutes les expériences il a été fait appel, en matière de charge, au sable d'Elbe tout-venant, de 7 mm au maximum (le même que pour le mélange F dans [5], abréviation P); le liant se composait d'alcool furylique (partie active du liant, abréviation FOL), d'aldéhyde furylique (accélérateur, abréviation FAL) et de catalyseur (azotate uréique mélangé aux fines inertes dans le rapport de 1 à 3, abréviation DM 25). Les éprouvettes étaient des prismes de $4 \times 4 \times 16$ cm, tassés à la main, conservés en moules pendant 24 heures à la température normale et, ensuite, pendant 28 jours à la température de 20 °C ou pendant 14 jours à 50 °C. Les essais ont été réalisés à l'aide de la machine d'essai universelle d'Amsler. Les rapports de mélange seront spécifiés séparément pour chacune des expériences.

L'influence de la durée de conservation à température légèrement élevée

Un durcissement parfait du bérol à la température normale ne s'obtient qu'après une période prolongée (une année et davantage). A une température légèrement élevée (voisine de 40° C), le durcissement parfait se produit déjà après quelques jours. Afin que les résultats des expériences soient comparables, il faut donc toujours opérer avec un matériau ayant parfaitement durci. La période minimale nécessaire au durcissement parfait est en outre importante du point de vue de l'exploitation et de l'économie. Il importe de connaître l'allure du durcissement afin de procéder, au moment opportun, au démoulage et au transport du produit. La conservation inutilement prolongée à une température plus élevée peut parfois être nuisible; en effet, elle peut donner lieu à

une légère réduction des résistances à la traction et compromettre le rapport avantageux entre les résistances à la compression et à la traction. Les figures 1a et 1b montrent les allures des résistances à la compression et à la traction en flexion du bérol, en fonction de la durée de conservation à 50 °C et de la composition du mélange. Il ressort de l'expérience que la quantité d'accélérateur (fural) n'exerce aucune influence essentielle sur la rapidité avec laquelle la résistance finale est atteinte lorsque le durcissement se poursuit à une température légèrement élevée. L'augmentation de la dose de fural réduit au contraire la résistance à la traction.

La conclusion qui se présente est qu'en général la durée de conservation ne dépasse pas 3 jours, à la température de 55 °C. La conservation de 28 jours, à la température plus élevée, s'avère inutile, voire préjudiciable.

L'influence du degré de température de conservation

Le degré de la température de conservation du bérol est d'une importance capitale pour la vitesse d'un durcissement parfait et la résistance finale, d'une part, et du point de vue économique, d'autre part. Pour ce qui est de la résistance, la température de 35-45 °C est suffisante, toute température plus élevée pouvant être, dans la majeure partie des cas, plutôt préjudiciable; elle se traduit par une résistance finale moins élevée et par l'augmentation des frais relatifs à l'énergie thermique nécessaire. La température de durcissement maximale tolérée est de 100 °C, la température la plus basse capable de garantir un durcissement parfait dans un temps acceptable est de 35 °C. La figure 2 montre la résistance finale à la compression et à la traction en flexion, en fonction de la température de durcissement. Il ressort de la figure 3 que les températures comprises entre 40 et 100 °C ont sensiblement le même effet durcissant pour les différents mélanges du bérol (la zone hachurée obliquement s'entend pour la résistance à la compression, la zone hachurée verticalement pour la résistance à la traction). Le durcissement à une température plus élevée (150 °C) provoque déjà une dégradation successive de la résine de polycondensation réduisant, avec la tension interne défavorable, la résistance à une valeur que l'on pourrait obtenir, pendant la même période, à la température normale de 20 °C.

1. Dans le texte ci-après, le béton de furane sera appelé, en abrégé, bérol.

2. Brevet tchécoslovaque n° 104815.

L'influence de l'humidité du milieu au cours du durcissement

Dans ses travaux précédents, l'auteur avait souligné l'importance de l'effet défavorable de l'humidité sur les propriétés mécaniques du bérol. L'influence de l'humidité de l'agrégat est considérable, notamment si elle se joint à l'humidité plus élevée du milieu dans lequel le durcissement se poursuit, comme il ressort de la figure 4. Cependant, même lorsqu'on emploie un tout-venant sec, l'humidité du milieu exerce une influence capitale sur la résistance finale. La figure 5 indique la décroissance de la résistance à la compression en cas d'augmentation de l'humidité du milieu à la température normale de 20 °C. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la résistance d'un bérol parfaitement durci (à 50 °C et à 10 % d'humidité relative). Il ressort de la figure 5 qu'une résistance de 100 %, donc un durcissement parfait, ne pourraient s'obtenir, à la température normale, que dans un milieu absolument sec. A l'humidité courante du milieu (50-75 %) on n'atteint, à la température normale, que 50 % de la résistance possible. En cas de conservation dans l'eau, le durcissement ne se produit pas du tout.

L'humidité relative du milieu dans lequel les éprouvettes sont confectionnées et conservées après le démoulage et dans lequel se poursuit la prise et le début du durcissement (24 heures environ) influe sur la résistance finale même lorsque le durcissement ultérieur se poursuit à une température plus élevée. La figure 6 montre ce changement de la résistance à la compression du bérol, lorsque le durcissement se poursuivait, après le démoulage, pendant 14 jours à la température de 50 °C et à l'humidité relative moyenne de 15 %. Après le durcissement, les éprouvettes ont été conservées pendant 14 jours

à la température de 20 °C et à des taux variés d'humidité (30, 50, 75 %) et soumises aux essais.

Dans la pratique, l'humidité relative du milieu au cours du durcissement du bérol devrait donc rester inférieure à 50-60 % sous peine d'entraîner une réduction démesurée de la résistance.

L'influence de l'humidité du milieu après le durcissement

L'humidité du milieu dans lequel le bérol est conservé après avoir durci exerce, comme le montre par exemple la figure 6, une influence considérable sur la résistance (3). Ce qui importe, c'est en particulier le rapport entre le liant et la charge, donc la composition du mélange. En ce qui concerne les mélanges de porosité discontinue, la réduction de la résistance à la suite de l'humidité croissante est minime, en comparaison des éprouvettes séchées. Seuls les mélanges d'une porosité continue accusent une réduction marquée de la résistance. Ceci confirme le fait que l'humidité plus élevée (ou l'eau) n'influent pas sur les propriétés du liant seul. La réduction de la résistance a un caractère physique, étant due à la tension interne défavorable dans la structure du matériau après un remplissage d'eau partiel ou complet des pores.

La figure 7 montre les variations de la résistance à la compression et à la traction en flexion (en pourcentage de la résistance du mélange correspondant après 28 jours, à 50 °C et à 15 % d'humidité relative) en fonction de l'humidité du milieu après le durcissement. En ce qui concerne le matériau d'une porosité discontinue (mélange 1/5), la résistance ne varie pas de façon apparente lorsque

3. Dans ce cas on entend par résistance la résistance dans un milieu de conservation déterminé. Si, après le séjour dans un certain milieu, les éprouvettes étaient séchées à la valeur qu'elles accusaient avant la conservation et si elles étaient vérifiées ensuite, les résistances resteraient pratiquement inchangées.

Fig. 4. — Influence de l'humidité de l'agrégat tout-venant sur la résistance du bérol.

Composition pondérale du mélange :
 résine de furul : 10
 furile-aldéhyde : 1
 azotate d'urée 25 % : 3
 sable jusqu'à 7 mm (70 % : 0-2 mm,
 20 % : 2-4 mm, 10 % : 4-7 mm) : 150.

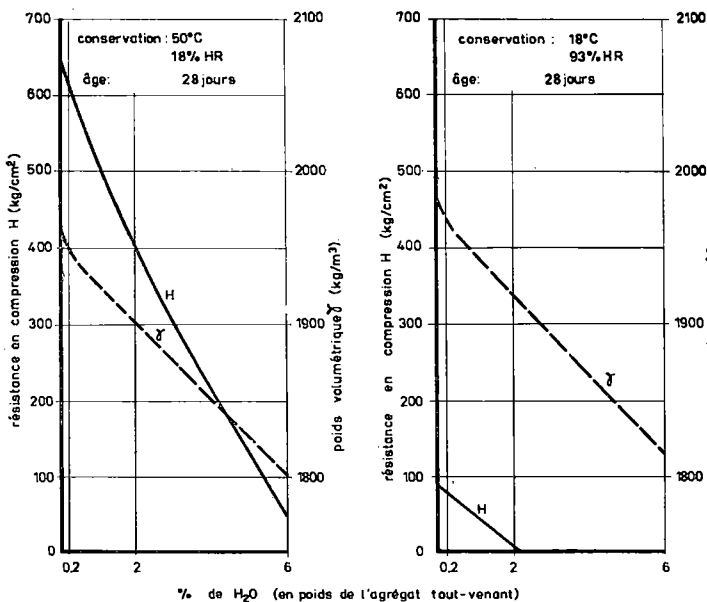
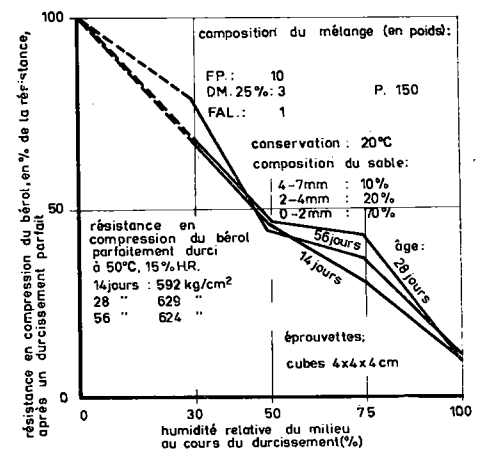


Fig. 5. — Variations de la résistance en compression du bérol durcissant, en fonction de l'humidité du milieu.



l'humidité augmente. Dans les mélanges d'une porosité continue, l'influence défavorable de l'humidité se manifeste au contraire de façon très nette. Remarquons que dans les zones comprises entre 60 et 70 % d'humidité relative, c'est-à-dire l'humidité à laquelle les éprouvettes étaient confectionnées, la résistance de tous les mélanges décroît approximativement à la même valeur, exprimée en pourcentage de leur résistance après 28 jours, à 50-60 °C et à 15 % d'humidité relative, (soit 70 % environ). L'humidité plus élevée (au-dessus de cette zone) fait décroître la résistance d'autant plus que le mélange est plus pauvre. Lorsque l'humidité est moins élevée, la réduction la plus prononcée de la résistance se manifeste dans le mélange 1/10, pendant que dans le mélange 1/15 on observe même une augmentation de la résistance en comparaison du matériau ayant durci en 28 jours, à 50 °C et à 15 % d'humidité relative. Il s'agit de toute évidence d'une diffusion des influences mutuelles fort compliquées du liant et de la charge, d'une part (en fonction des conditions de durcissement) du matériau et du milieu, d'autre part.

L'explication et la séparation de ces phénomènes ne sont guère aisées et demanderont des études approfondies au point de vue de la mécanique physico-chimique.

Une autre figure, représentant la même expérience (fig. 8) fait ressortir d'autres faits intéressants. La fabrication des éprouvettes et le début de leur durcissement (après le démoulage) avaient lieu à la température de 18-20 °C et à l'humidité relative de 65-75 %. La figure 8 montre que la tension interne secondaire due à la conservation ultérieure dans un milieu humide atteint son minimum justement dans cette zone d'humidité. L'observation des courbes représentant le matériau de porosité continue (au-delà du rapport 1/10), nous apprend que la réduction effective de l'humidité (à 30-50 % d'humidité relative) par rapport à l'état au moment de la fabrication entraîne une amélioration de la tension interne telle que le décroissement de la résistance se ralentit et que cette dernière vient même à augmenter. Cela se manifeste différemment selon le rapport entre la charge et le liant dans un mélange, ce qui se comprend si nous prenons en considération la tension interne primaire qui se crée entre le liant et la charge pendant le durcissement. Pour les mélanges différents, l'influence de la conservation à 70 % d'humidité relative est sensiblement la même. Aux humidités supérieures à celle du moment du traitement du matériau ou en cas de conservation dans l'eau, la résistance décroît en raison directe de la quantité de liant (à la suite de l'augmentation de la porosité). La partie des courbes relatives au matériau d'une porosité discontinue (jusqu'au rapport 1/10) montre logiquement que la résistance décroît lorsque la quantité de charge augmente et cela d'autant plus rapidement que l'humidité du milieu est plus élevée.

Ces comparaisons nous permettent de conclure qu'au point de vue de la résistance, la tension interne secondaire la plus avantageuse correspond au rapport 1/15 environ (volume du liant actif : volume de la charge = 0,242 : 0,758) et que la tension interne primaire la plus avantageuse se produit dans un milieu voisin de celui dans lequel le matériau avait été confectionné et dans lequel il avait commencé à durcir. La première zone n'est toutefois pas constante et dépend du pourcentage de vides de la charge. Dans le cas d'un matériau séché, le deuxième maximum de la résistance sera le plus élevé pendant que, pour le matériau complètement saturé d'eau, il n'apparaîtra pas du tout et la courbe des résistances baisse de façon continue proportionnellement à la quantité décroissante de liant [3].

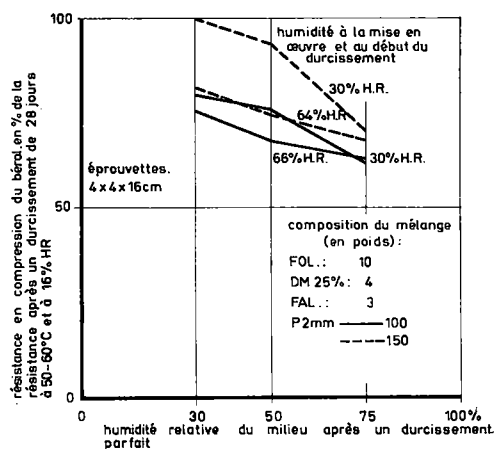


Fig. 6. — Variations de la résistance en compression du béton en fonction des compositions du mélange, des conservations après durcissement, de l'humidité du milieu pendant la mise en œuvre et au début du durcissement (avant le démoulage).

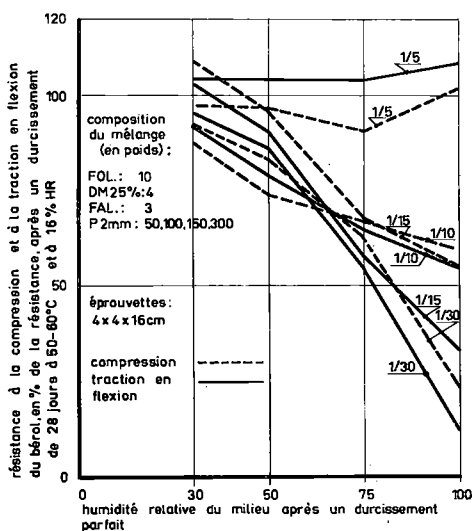


Fig. 7. — Variations de la résistance à la compression et à la traction en flexion du béton parfaitement durci, en fonction de la conservation dans un milieu à humidités variées, par rapport à la résistance du béton conservé à 55-60°C, 15 % d'humidité relative.

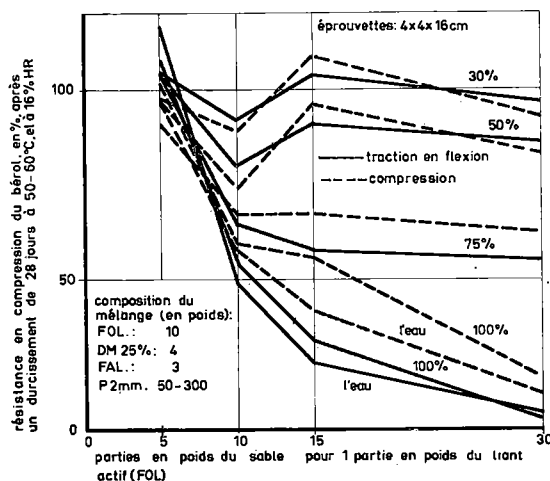
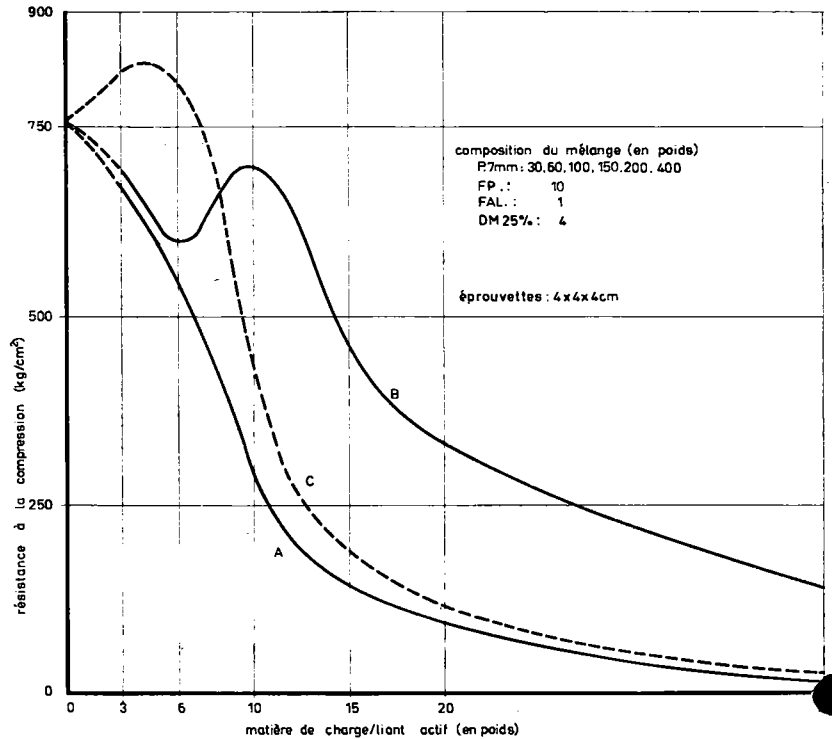


Fig. 8. — Variations de la résistance à la traction et à la compression du béton parfaitement durci en fonction de la composition et de la saturation en eau ou en vapeur d'eau.

Fig. 9. — Variations de la résistance du bérol durci pendant 14 jours à 50°C en cas de modification du rapport entre le liant actif et la matière de charge.

Courbe A : bérol complètement saturé d'eau,
 — B : bérol partiellement séché,
 — C : bérol séché après l'essai à l'eau en ébullition.



L'influence de la saturation d'eau

Il est notoire, et nous l'avons déjà fait remarquer, qu'une fois durcie, la résine de furol résiste sans faute à l'influence prolongée de l'eau. Il en est de même pour le bérol à condition toutefois que sa porosité soit discontinue, fermée. Lorsque l'influence de l'eau s'exerce sur le bérol de porosité continue, la résistance de ce dernier décroît d'autant plus que les pores sont plus ouverts, cela jusqu'à ce que les pores-canaux soient suffisamment petits. Il ne s'agit pas d'une action chimique (le liant doit en effet résister même en cas de porosité continue du matériau), mais d'une action physique. L'eau remplissant les pores compromet la tension interne, que le corps soit déchargé (influence de la tension de contact) ou chargé (influence de l'incompressibilité de l'eau et transmission défavorable de la tension). La courbe de la figure 9 montre l'allure de la résistance du bérol complètement saturé d'eau (4). Ces valeurs de la résistance peuvent être considérées comme des valeurs minimales possibles, tout autre mode de conservation dans un milieu moins humide se traduisant par l'augmentation de la résistance dans la zone de porosité continue du matériau. La courbe B exprime l'allure de la résistance du bérol qui a été conservé, au début, dans les mêmes conditions que les éprouvettes précédentes, mais que l'on conservait plus tard, pendant le même intervalle de temps, à l'air (5). Cette courbe n'est pas maximale, le maximum ne pouvant être atteint qu'au prix d'un séchage complet de l'éprouvette. La courbe C, relative aux éprouvettes soumises à l'eau en ébullition, montre que la réduction de la résistance n'est pas due aux effets chimiques (6). Nous ne constatons aucune ondulation locale de la courbe, la résistance ayant augmenté dans la zone de porosité discontinue pendant que dans la zone de porosité continue il y avait une destruction de la structure sous l'influence

4. Après avoir été conservées, pendant quatorze jours, à 50 °C et à 15 % d'humidité relative, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant trois mois et soumises aux essais à l'état mouillé.

5. Trois mois à 15-24 °C et à 30-45 % d'humidité relative.

6. Après avoir été conservées à une température plus élevée, les éprouvettes ont été exposées à l'effet de l'eau bouillante pendant quatre heures. Elles ont été ensuite conservées pendant quatorze jours dans un milieu de 50 °C et de 15 % d'humidité relative.

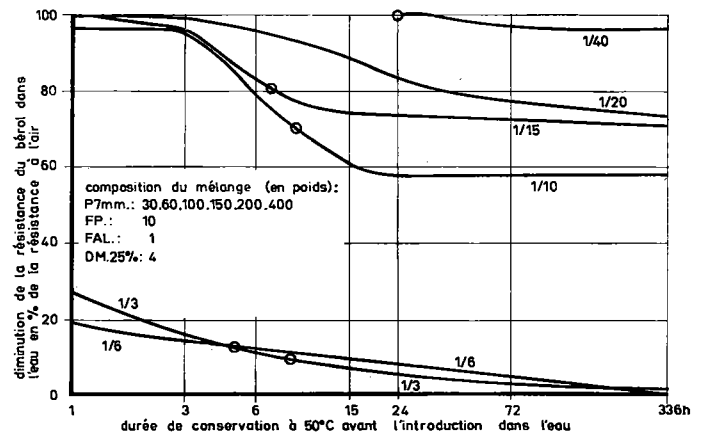


Fig. 10. — Diminution de la résistance du bérol dans l'eau, exprimée en % de sa résistance à l'air, en fonction des durées de conservation à 50°C avant son introduction dans l'eau et en fonction de la composition du mélange.

d'une surpression interne puissante à l'ébullition. Dans son étendue entière, la courbe C se trouve toutefois au-dessus de la courbe A. La figure 10 montre enfin la décroissance de la résistance du bérol de durcissement et de compositions variées après une conservation dans l'eau pendant trois mois (en fonction de la durée de conservation avant l'introduction dans l'eau), en pourcentage de la résistance du matériau conservé à l'air pendant le même intervalle de temps. Nous pouvons constater de nouveau des différences considérables des décroissances de la résistance selon que la porosité était discontinue (1/3, 1/6) ou continue (1/10-40). Les petits ronds indiquent, sur les courbes, les points déterminant les durées de conservation à la température plus élevée qui correspondent (le décroissement de la résistance étant toujours le même) à la conservation de vingt-huit jours à la température normale. Ces notions sont très importantes au point de vue de l'intervalle de temps minimum permis après lequel il est possible de commencer à solliciter chimiquement le bérol sans que ses propriétés physiques s'en trouvent affectées. Il est en outre possible de constater qu'au point de vue de la résistance chimique, un durcissement de vingt-huit jours à la température normale est absolument insuffisant.

PROJET D'UN BÉROL D'UNE RÉSISTANCE DÉTERMINÉE

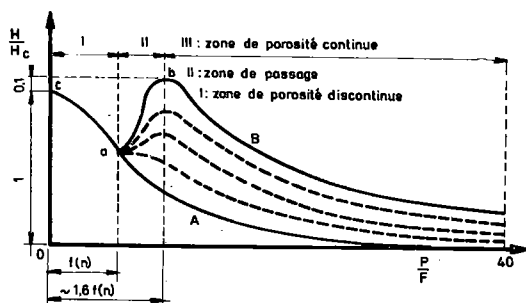


Fig. 11. — Variations de la résistance du bérol en fonction du rapport : charge/liant actif et des degrés de saturation d'eau.

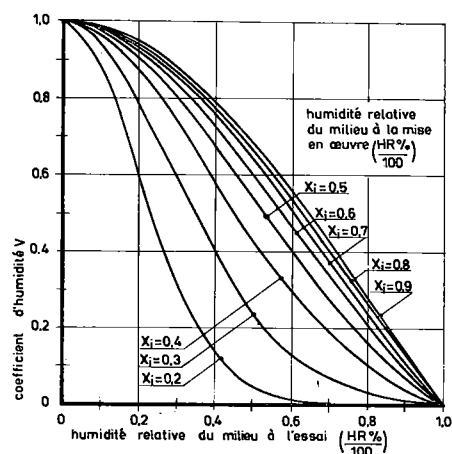


Fig. 12. — Allures de la fonction d'interpolation V en fonction des variations de la résistance du bérol dans les zones II et III d'humidité différente du milieu à l'essai et à la mise en œuvre.

Certaines relations valables pour le projet approximatif d'un bérol d'une résistance déterminée ont déjà été mentionnées par l'auteur [2]. En vue d'un projet plus précis de mélange, il faut adopter une méthode différente, notamment dans la zone de passage entre les porosités continue et discontinue et au commencement de la zone de porosité continue où l'interdépendance de la résistance et des proportions de la charge et du liant actif est très compliquée. Nous avons constaté que c'était l'humidité du milieu à la fabrication et, en particulier, au durcissement du bérol, qui contribuait le plus aux anomalies dans cette zone. Étant donné le stade actuel des recherches, il nous est impossible de décrire de façon satisfaisante et dans toutes leurs corrélations, les valeurs physiques (et peut-être même chimiques), influençant, suivant toute l'étendue, l'allure de la résistance du bérol. Nous devons nous contenter d'une expression demi-empirique basée sur les phénomènes résultants et non pas sur les causes de ces phénomènes. Nous adopterons, comme fonction de base, une courbe continue A (fig. 11) exprimant les variations de la résistance du bérol en fonction des proportions de la charge et du liant, à l'état d'une saturation d'eau complète. Nous pouvons supposer que cette courbe indique les résistances minimales pouvant être atteintes

pour les proportions variées de la charge et du liant, sans qu'il soit tenu compte de l'influence du milieu (?).

Des systèmes imparfaitement saturés jusqu'aux systèmes séchés les propriétés mécaniques restent les mêmes dans la zone de porosité discontinue (depuis le commencement jusqu'au point a) variant en fonction des proportions de la charge et du liant selon la même courbe A. Dans la zone de porosité continue, les propriétés mécaniques commencent à être influencées par l'humidité du système. Ainsi, par exemple, la résistance du système croît dans la même mesure que le degré de séchage. Conformément à la courbe B (fig. 11), la résistance du système atteint son maximum lorsque le séchage est parfait. Nous pouvons supposer que cette courbe indique les résistances maximales accessibles pour certaines proportions de la charge et du liant. Dans le cas de systèmes dont l'humidité se trouve entre les deux valeurs extrêmes indiquées (correspondant à l'humidité du milieu dans lequel le bérol est conservé avant l'essai), les fonctions affectent la forme de la courbe B et sont exprimées par une courbe disposée entre les courbes A et B. A mesure que l'humidité croît, le sommet b baisse et lorsque la saturation est complète, la courbe coïncide avec la courbe A.

La façon dont varie l'ordonnée de la résistance en fonction de l'humidité du milieu au confectionnement et à la conservation (au vieillissement) de l'éprouvette, est déterminée, conformément aux résultats des expériences, par la fonction :

$$V = \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{2x_i^2}}} \left(e^{-\frac{x^2}{2x_i^2}} - e^{-\frac{1}{2x_i^2}} \right),$$

où $x_i = \frac{(HR)_0}{100}$, $x = \frac{(HR)_T}{100}$, $(HR)_0$ étant l'humidité relative du milieu au confectionnement de l'éprouvette (sur cette abscisse se trouve le point d'inflexion V de la courbe) $(HR)_T$ étant l'humidité relative du milieu avant et pendant l'essai ou, plus exactement, l'humidité relative correspondant au degré de saturation d'eau de l'éprouvette au moment de l'essai. La figure 12 représente l'allure de cette fonction d'interpolation de l'humidité.

En déterminant le caractère des courbes A et B nous nous sommes basés sur les valeurs moyennes résultant d'un grand nombre d'expériences. Les courbes sont tracées en ordonnées relatives (se rapportant à la résistance du liant seul); les abscisses expriment la proportion pondérale de la charge et de la partie active du liant.

Il ressort de l'analyse des courbes que :

a) L'ordonnée maximale de la courbe B (point b) est égale au produit par 1,1 de l'ordonnée de la courbe A pour le liant seul (au commencement : point c);

b) Les abscisses des deux points extrêmes de la courbe B (points a et b) sont fonction, en premier lieu, de la compacité du bérol durci ou, à condition d'un traitement égal, du pourcentage de vides de la charge. Le minimum, ou l'endroit de bifurcation des deux courbes (point a), se trouve au point de compacité maximale (poids volumétrique maximal) du système. Le maximum de la courbe B (point b) se trouve à l'endroit caractérisé par la tension interne la plus avantageuse, lorsqu'à la formation des pores du liant dans les intervalles de la charge, il n'y a

7. Il est évident que, dans tous ces raisonnements, il s'agit toujours du bérol parfaitement durci.

pas encore un manque de liant nécessaire à l'enveloppement de tous les granules. Cet endroit se trouve aux environs du produit par 1,6 de l'abscisse du point avec la compacité maximale (point a);

c) Au point d'abscisse 40 (rapport pondéral entre la charge et le liant actif), l'ordonnée de la courbe B est égale au produit par 0,2 de l'ordonnée de la courbe A pour le liant seul;

d) Pour les mélanges à humidité variée, l'allure des courbes correspondantes B' dans toute la zone II et III est conforme à la fonction d'interpolation V entre les courbes limites A et B.

Il est possible de supposer que l'endroit de compacité maximale correspond à une proportion de mélange de liant et de la charge (au passage de la porosité discontinue à la porosité continue) pour laquelle les granules de la charge se trouvent à la plus petite distance possible les uns des autres et pour laquelle tous les intervalles sont remplis de liant. Ceci a lieu lorsque le volume des intervalles de la charge serrée, multiplié par le coefficient d'excès nécessaire du liant est exactement (et uniquement) égal au volume du liant fourni (8).

Le coefficient d'excès du liant dépend en premier lieu du pourcentage de vides de la charge. Il a été trouvé que moins le pourcentage de vides est élevé, plus l'excès de liant doit être élevé afin que le mélange le plus compact soit obtenu.

A $\mu = 0,5$ aucun excès de liant n'est nécessaire pour obtenir le mélange le plus compact; à $\mu = 0,1$, il faut une quantité de liant égale au double du volume des intervalles. Cette notion est exprimée par la fonction affectant la forme :

$$N = 0,7413 \mu^{-0,481}$$

selon la figure 13 où μ représente le pourcentage de vides de la charge serrée, et N le coefficient d'excès du liant nécessaire pour obtenir le mélange le plus compact.

8. On entend par liant la totalité du liant F, c'est-à-dire accélérateur et catalyseur compris, ceux-ci entrant dans la réaction au moment de la polymérisation. Par contre, les abscisses des courbes A, B, indiquent le rapport pondéral entre la charge et le liant actif F (donc sans accélérateur ni catalyseur).

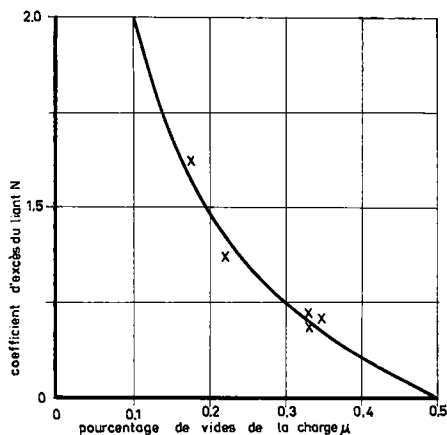


Fig. 13. — Variations du coefficient d'excès du liant dans le mélange le plus dense avec pourcentage de vides de la charge et modèle de la courbe pour sa description mathématique.

Après réduction à la proportion pondérale de la charge P et du liant actif \bar{F} et en introduisant le coefficient d'excès du liant, l'abscisse du point a des courbes A et B s'exprime comme suit :

$$\left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a = \frac{g}{\gamma_f \cdot 0,7413 \cdot \mu \cdot \mu^{-0,481}} \left[1 + \frac{FAL}{\bar{F}} \frac{\gamma_f}{\gamma_{fal}} + \frac{DM 100}{\bar{F}} \frac{\gamma_f}{\gamma_{dm 100}} \right]$$

Pour le rapport de mélange optimal du liant on a :

$$\bar{F} : FAL : DM 100 = 10 : 1,5 : 1$$

et, en introduisant les poids spécifiques correspondants $\gamma_f, \gamma_{fal}, \gamma_{dm 100}$ et le poids volumétrique de la charge $g = \gamma_P (1 - \mu)$, nous avons :

$$\left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a = 3,82 \frac{1 - \mu}{\mu^{0,569}}$$

Pour la description mathématique de la courbe A c'est la fonction de la forme :

$$y = ax^b \cdot e^{-cx}$$

qui convient le mieux (avec le commencement décalé dans le sens de l'axe x).

La solution donne, pour le béril :

$$y_A = 1,0391 (x + 2,0188)^{0,5012} \cdot e^{-0,1984 (x + 2,0188)}$$

Pour la description mathématique de la courbe B il a été fait appel à une fonction du type similaire :

$$\bar{y}_B = h \left[x - \left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a \right] \left\{ d \left[x - \left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a \right]^{f-1} \cdot e^{-g \left[x - \left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a \right]} - 1 \right\}$$

(avec le commencement au point a, où les courbes A et B bifurquent).

Les paramètres h, d, f, g ne peuvent être exprimés numériquement, étant fonctions de $\left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a$:

$$h = \frac{K_1 - 0,20}{40 - \mu}$$

$$d = \frac{K_2}{h} (0,6 \bar{\mu})^{-f} \cdot e^{g(0,6 \bar{\mu})}$$

$$f = \frac{h(0,6 \bar{\mu})}{K_3} + (0,6 \bar{\mu}) g$$

$$g = \frac{lg \frac{K_2}{K_3} - 0,6 \bar{\mu} K_4 lg \frac{40 - \mu}{0,6 \bar{\mu}}}{0,6 \bar{\mu} lg \frac{40 - \mu}{0,6 \bar{\mu}} - (40 - 1,6 \bar{\mu})}$$

où :

$$K_1 = 1,0391 (\bar{\mu} + 2,0188)^{0,5012} \cdot e^{-0,1984 (\bar{\mu} + 2,0188)}$$

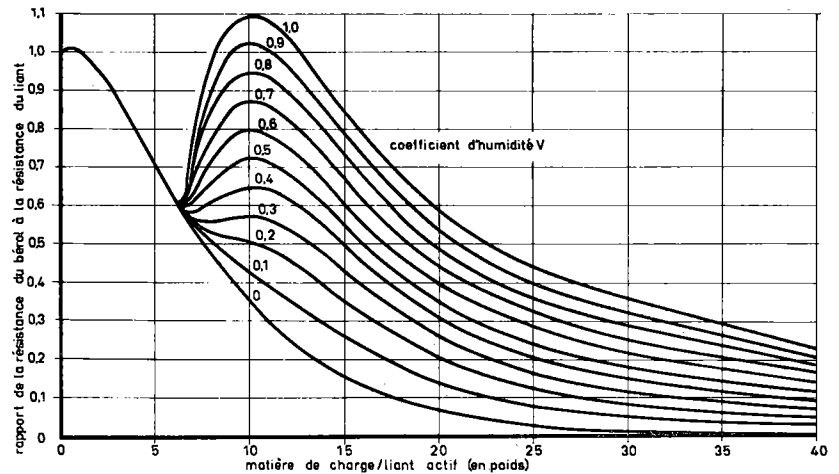
$$K_2 = \frac{0,24394}{(K_1 - 0,20) \bar{\mu}}$$

$$K_3 = (1,1 - K_1) + h(0,6 \bar{\mu})$$

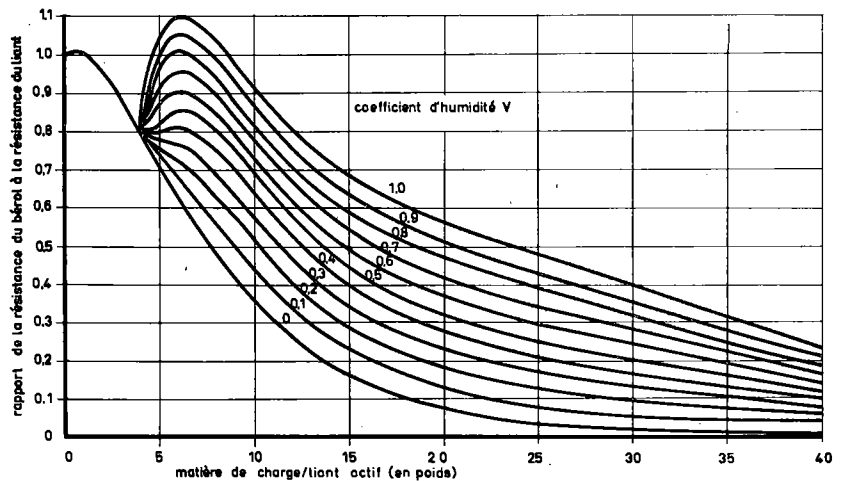
$$K_4 = \frac{h}{K_3}$$

et $\bar{\mu}$ (pour simplifier les termes) égal à $\left(\frac{P}{\bar{F}}\right)_a$.

Fig. 14-15. — Résistance du bérol en fonction de sa composition, du pourcentage de vides et de l'humidité du milieu.



Pourcentage de vides de la charge $\mu = 0,25$.



Pourcentage de vides de la charge $\mu = 40$.

Pour l'ordonnée générale $x \leq \bar{\mu}$ est valable l'équation de la courbe A (sans qu'il soit tenu compte de l'humidité).

Pour l'ordonnée générale $x \geq \bar{\mu}$ et le coefficient d'humidité V l'équation résultante pour la courbe B' est :

$$y_{B'} = (K_1 + \bar{y}_B) V + y_A (1 - V);$$

d'où l'on tire, à $V = 0$ (soit H.R. = 100 %) :

$$y_{B'} = y_A$$

et, à $V = 1$ (soit H.R. = 0 %),

$$y_{B'} = K_1 + \bar{y}_B = y_B.$$

En vue de l'application pratique des relations mentionnées, l'auteur avait calculé les courbes A, B, B' pour $\mu = 0,10-0,40$ par 0,05 et pour $V = 0-1$ par 0,1. A titre d'exemple, les figures 14 et 15 représentent, sous forme de graphiques, les allures des courbes A, B, B' pour $\mu = 0,25$ et pour $\mu = 0,40$.

Pour déterminer l'ordonnée absolue (de résistance), les valeurs proportionnelles selon les relations mentionnées devront être multipliées par le coefficient [3] $\mathcal{J}_{\mathcal{F}}$, c'est-à-dire par la résistance du liant seul. En ce qui

concerne la résine de furol-fural, compte tenu de sa composition, le coefficient résulte de l'expression :

$$\mathcal{J}_{\mathcal{F}} = 750 k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

où :

$$k_1 = -7,5803 \left(\frac{\text{FAL}}{\text{FP} + 1,0601 \text{ FOL} + 1,0447 \text{ FAL}} \right)^2 + 3,2809 \left(\frac{\text{FAL}}{\text{FP} + 1,0601 \text{ FOL} + 1,0447 \text{ FAL}} \right) + 0,648$$

$$k_2 = 1,22 - \left(\frac{\text{FOL}}{0,9433 \text{ FP} + \text{FOL}} - 0,44 \right) 0,5$$

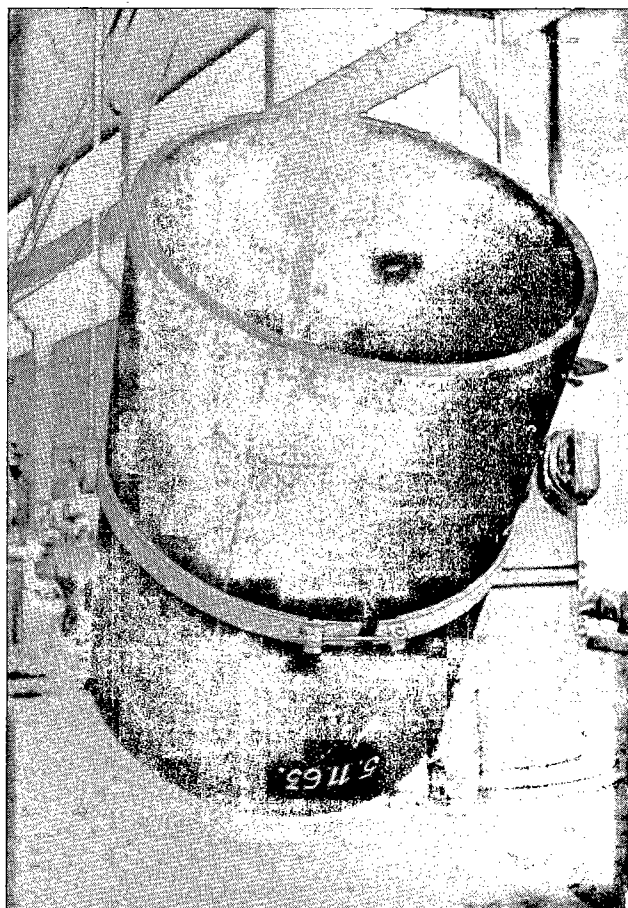
$$k_3 = -1,537 \left(\frac{\text{DM 100}}{\text{DM 100} + 1,554 \text{ FAL}} \right)^2 + 1,741 \left(\frac{\text{DM 100}}{\text{DM 100} + 1,554 \text{ FAL}} \right) + 0,760.$$

Ici, FP, FOL, FAL, DM 100 indiquent les quantités en poids de la résine de furol (produit de polycondensation partiel du furol), du furol, du fural et du catalyseur de 100 % respectivement.

Pour le liant de composition FOL : FP : FAL : DM 25 = 0 : 10 : 1 : 4 on a

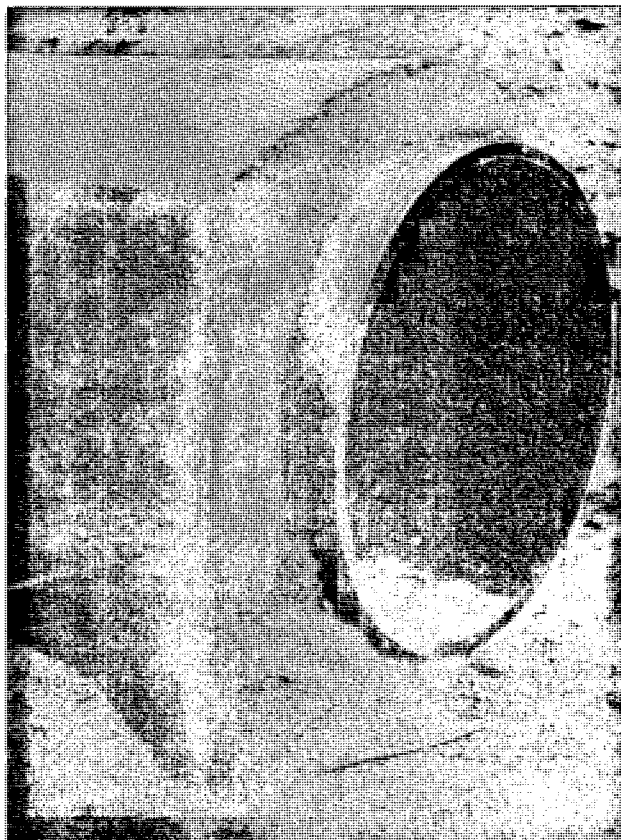
$$k_1 = k_2 = k_3 = 1 \text{ et } \mathcal{J}_{\mathcal{F}} = 750 \text{ (kg/cm}^2\text{)}.$$

APPLICATION DES BÉTONS DE FURANE



16

En Tchécoslovaquie, le bérol a été déjà utilisé à la fabrication d'une canalisation de grande dimension (de 140 cm de diamètre) servant à l'évacuation d'eaux résiduaires fortement agressives des usines chimiques (fig. 16, 17). Les puits de visite de cette canalisation ont également été réalisés avec revêtements de grandes dimensions en bérol. Dans une grande usine chimique, en voie de construction, on procède actuellement à l'installation d'un plancher en dalles de bérol, résistant aux acides.



17

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARES R., « Berol a furan-base building material », *Technical digest*, 6, 1962, SNTL, Praha.
- [2] BARES R., « Les bétons de résine à base des résines de furane. Le bérol », Symposium R.I.L.E.M. par correspondance « Resin concrete », 1964.
- [3] BARES R., NAVRÁTIL J., BERKA L., JAVORNICKY J., « Practical application of synthetic constructive material, as a result of exact definition of material properties », Symposium R.I.L.E.M., Liège, 1964 International symposium on the research and reception tests of synthetic materials for construction.
- [4] BARES R., NAVRÁTIL J., BERKA L., JAVORNICKY J., « Physico-mechanic properties of resin concrete », Discussion to the R.I.L.E.M. symposium by correspondence « Resin concrete », 1964.
- [5] BARES R., « Bétons de plastiques, Journées des Plastiques dans le Bâtiment », *Cahiers du C.S.T.B.*, Livraison 76, cahier 647 octobre 1965.