

## CONTRÔLER LE POMPAGE DU BÉTON AVEC LES OUTILS DE LA RHÉOLOGIE

**Denis KAPLAN**

Doctorant LCPC-CALIBE

Actuellement ingénieur au Centre technique du groupe Italcementi

**Thierry SEDRAN**

Ingénieur des Travaux publics de l'État

Division Méthodes et matériels de construction et d'entretien des routes

**François de LARRARD**

Docteur ENPC

Chef de la division Méthodes et matériels de construction  
et d'entretien des routes

Laboratoire central des Ponts et Chaussées - Centre de Nantes

**J.-P. BUSSON**

**G.R. SARRACO**

Béton de Paris

**F. CUSSIGH**

GTM Dumez

**J.-L. DUCHENE**

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien

**A. THOMAS**

Putzmeister France

**Note**

**technique**

de la pression. Les vitesses utilisées lors de cet essai sont toutefois plus faibles que celles appliquées sur le béton lors d'un pompage. De plus, les essais de pompage ont confirmé que, dans le cas des bétons saturés (\*), les pertes de pression et donc les frottements sont indépendants de la pression. On a donc développé un autre type d'appareil mesurant les propriétés de l'interface béton-tuyau à la pression atmosphérique, et permettant d'appliquer la gamme de vitesses réellement utilisées pendant les pompages : le BTRHEOM modifié. Cette note présente les premiers résultats obtenus.

### **Adaptation du rhéomètre BTRHEOM pour la caractérisation de l'interface acier-béton**

#### **Description de l'appareil et principe de l'essai**

L'appareil a été développé sur la base du rhéomètre à béton BTRHEOM [4,5,6]. La pièce immobile 1 (fig. 1) contient 13 l de béton. Un tapis en caoutchouc 2 est placé au fond de cette pièce ; il permet d'assurer l'étanchéité entre la pièce immobile 1 et la pièce tournante 3. La figure 2 montre l'appareil monté et fixé sur le bloc moteur 4 assurant la rotation de la pièce tournante. Le béton est donc placé entre une pièce immobile et une pièce tournante (fig. 3). L'essai est piloté par le logiciel d'acquisition ADRHEO. La rotation de la pièce tournante provoque la formation d'une couche limite du coulis à l'interface acier-béton qui permet un glissement entre la pièce en mouvement et l'échantillon de béton restant immobile.

(\*) Browne et Bamforth [7] supposent que les bétons ayant suffisamment de pâte pour former une couche limite de glissement présentent des profils de pression linéaire lors du pompage. Ils appellent ces bétons « saturés ». La plupart des bétons pompés ont une consistance très plastique à fluide, et peuvent donc être considérés comme saturés.

#### **Introduction**

Le pompage est une technique de transport du béton frais permettant l'amenée du matériau frais dans le coffrage, sans recours à une benne ou à une bande transporteuse. Les règles actuelles de formulation des bétons pompables sont essentiellement qualitatives et les essais en vraie grandeur sont toujours nécessaires pour s'assurer, d'une part, de la pompabilité d'une composition donnée dans une installation donnée et, d'autre part, pour déterminer la pression nécessaire pour refouler un béton à un débit fixé. Sur la base de ces constatations, une recherche a été entreprise dans le cadre du projet national CALIBE, dont les premiers résultats sont décrits dans cette note.

Les approches existantes [1,2,3] se basent sur des abaques qui permettent de déterminer les pertes de pression dans un circuit donné (longueur, diamètre des tuyaux) à partir de l'affaissement au cône d'Abrams du béton. Or, des essais de pompage, récemment exécutés sur un circuit instrumenté dans le cadre du projet national CALIBE, ont montré que les pertes de pres-

sion engendrent des contraintes de cisaillement qui sont systématiquement inférieures au seuil de cisaillement du béton (excepté pour les bétons autonivelants). Il apparaît donc que la plupart des bétons ne sont pas cisailés au cours du pompage ; comme l'affaissement est directement lié au seuil de cisaillement [4,5], cette constatation montre les limites de l'utilisation des abaques.

Browne et Bamforth [7] ainsi que Vasilev [8] ont constaté qu'une couche limite de coulis de 1 à 5 mm d'épaisseur se forme au voisinage de la paroi lors d'un pompage. Les pertes de pression sont alors provoquées par le cisaillement localisé dans cette couche, et le béton glisse grâce à cette couche limite. Il s'avère donc que les paramètres de pompage dépendent essentiellement des propriétés de l'interface béton-tuyau. Les phénomènes de frottement de mélanges concentrés eau-argile contre des surfaces métalliques ont été analysés par Djelal [9] à l'aide d'un tribomètre à mouvement rectiligne, qui permet d'étudier le frottement en fonction de la vitesse et

**Le tribomètre  
à cylindres coaxiaux**

Fig. 1 - Vue générale.

1. Pièce immobile.
2. Joint en caoutchouc.
3. Pièce tournante.
4. Bloc moteur.

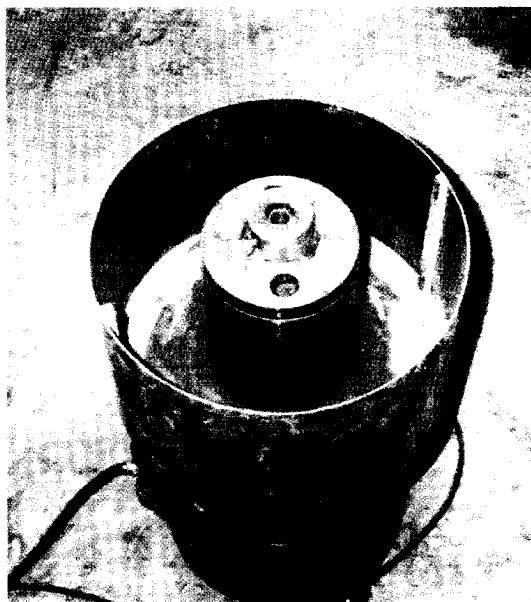


Fig. 2 - Le tribomètre vide.

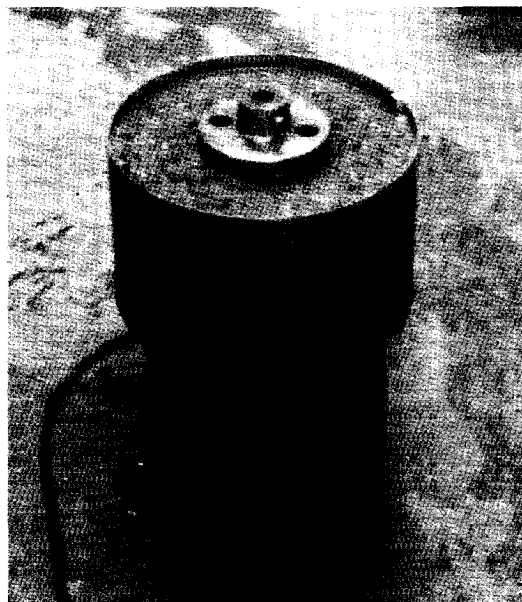


Fig. 3 - Le tribomètre rempli avec le béton.

On mesure alors le couple nécessaire pour maintenir différentes vitesses imposées. Notons que le béton reste immobile tant que la contrainte de l'interface ne dépasse pas son seuil de cisaillement. Il s'agit finalement d'une géométrie classique - celle du viscosimètre à cylindres coaxiaux - mais utilisée de manière nouvelle (cylindre lisse pour limiter le cisaillement du béton dans la masse). Pour cette raison, on peut parler pour ce nouvel appareil de tribomètre à cylindres coaxiaux.

**Dépouillement**

Les résultats bruts de l'essai au tribomètre à cylindres coaxiaux se présentent sous la forme d'un diagramme donnant le couple en fonction de la vitesse de rotation (fig. 4). Lors des essais, on trouve deux cas de figure.

■ Dans le premier cas, l'échantillon de **béton reste immobile** pendant l'essai et le cisaillement se localise uniquement dans la couche de l'interface acier-béton. Autrement dit, la pièce tournante

glisse par rapport au béton qui reste immobile. On constate que l'on obtient une relation de la forme :

$$\Gamma_{\text{tot}} = \Gamma_0 + k\Omega_g \quad (1)$$

- où
- >  $\Gamma_{\text{tot}}$  est le couple total appliqué sur le cylindre tournant mesuré (en N.m),
  - >  $\Gamma_0$  est le couple à l'origine (en N.m),
  - >  $k$  est le coefficient de régression linéaire (en N.m.s/rad),

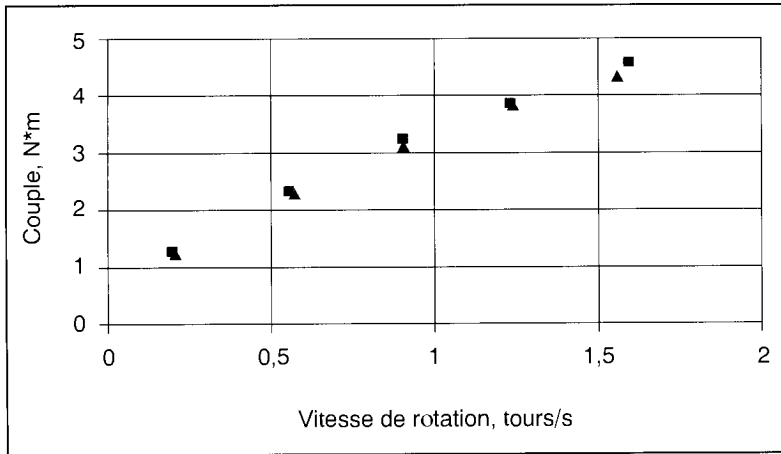


Fig. 4 - Résultat de mesure au tribomètre à cylindres coaxiaux : évolution du couple en fonction de la vitesse de rotation.

➤  $\Omega_g$  est la vitesse angulaire relative de glissement (en rad/s) (égale dans ce cas à la vitesse de rotation de la pièce tournante).

La prise en compte de la géométrie de l'appareil suffit alors pour déterminer les paramètres de la loi d'interface :

$$\tau_{oi}^t = \frac{\Gamma_0}{2\pi R^2 h} \quad (2)$$

où

- $\tau_{oi}^t$  est le seuil de l'interface (en Pa),
- R est le rayon de la pièce tournante (en m),
- h est la hauteur de l'échantillon du béton (en m).

$$\eta^t = \frac{k}{2\pi R^3 h} \quad (3)$$

où  $\eta^t$  est la constante visqueuse de l'interface (en Pa.s/m).

■ Dans le second cas, la vitesse de rotation est suffisamment élevée pour que le **béton commence à être cisailé**. Il existe toujours un glissement, mais le béton a également une certaine vitesse de rotation ; la vitesse de rotation du cylindre intérieur est alors la somme de la vitesse de glissement paroi-béton et de la vitesse du béton, au voisinage du cylindre :

$$\Omega_g = \Omega_{tot} - \Omega_{bét} \quad (4)$$

où

- $\Omega_{tot}$  est la vitesse angulaire de rotation de la pièce tournante (en rad/s),

➤  $\Omega_{bét}$  est la vitesse angulaire de rotation du béton au voisinage du cylindre extérieur (en rad/s),

➤  $\Omega_g$  est la vitesse angulaire relative de glissement (en rad/s).

En considérant le béton comme un fluide de Bingham, on obtient l'équation suivante :

$$\Omega_{bét} = \frac{1}{2\mu} \left[ \frac{\Gamma_{tot}}{2\pi h R^2} - \tau_0 \left( 1 + \ln \frac{\Gamma_{tot}}{2\pi h R^2 \tau_0} \right) \right] \quad (5)$$

où

- $\Omega_{bét}$  est la vitesse de rotation de béton (en rad/s),
- $\Gamma_{tot}$  est le couple total mesuré (en N.m),
- $\tau_0$  est le seuil de cisaillement du béton (en Pa),
- $\mu$  est la viscosité plastique du béton (en Pa.s),
- R est le rayon de la pièce tournante (en m),

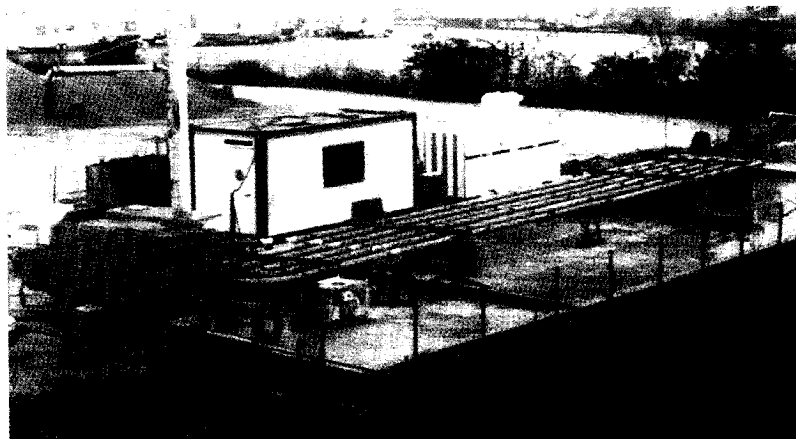


Fig. 5 - Circuit-pilote à Roissy-en-France.

➤ h est la hauteur de la pièce tournante en contact avec le béton (en m).

La connaissance des propriétés rhéologiques du béton, mesurées avec le rhéomètre à béton BTRHEOM [4], nous permet alors de déduire des équations (4) et (5) la relation entre  $\Omega_g$  et  $\Gamma_{tot}$  et donc de retrouver les paramètres de la loi d'interface dans les équations (2) et (3). Notons que, de façon générale, il faut effectuer le calcul suivant le second cas. Si le béton n'est pas cisailé dans l'appareil, l'équation (5) n'a pas de sens physique et on trouve une vitesse de rotation négative. Cela prouve qu'on peut directement utiliser les formules (2) et (3).

## Première validation sur quelques essais de pompage

### Circuit-pilote

Dans le cadre du projet national CALIBE, un circuit expérimental de 150 m de long, dont le diamètre de tuyauterie était égal à 125 mm, a été mis en place sur le site d'une centrale à béton à Roissy-en-France (fig. 5). Ce circuit a été instrumenté avec douze capteurs de pression et un débitmètre à béton, ce qui a permis d'établir les courbes débit/pression amont (pression à la sortie de la pompe) pour les bétons testés. Des essais au rhéomètre BTRHEOM et au tribomètre à cylindres coaxiaux ont été menés en parallèle avec les essais de pompage.

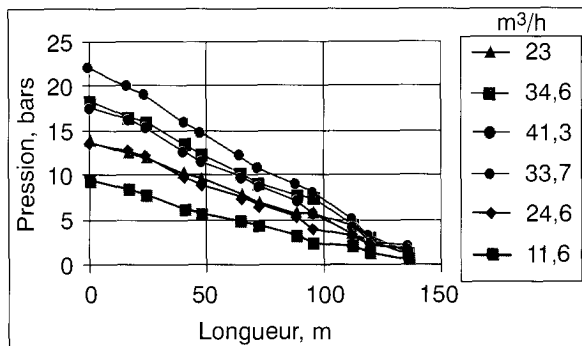


Fig. 6 - Pressions mesurées le long du circuit pour différents débits.

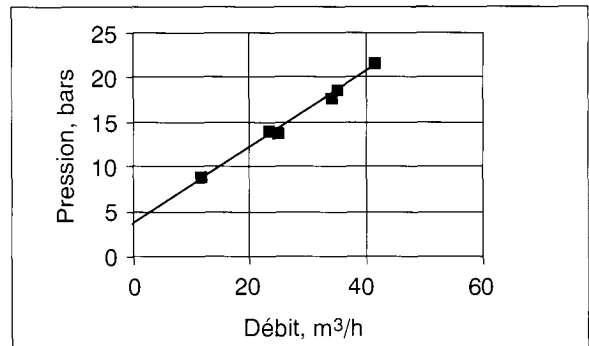


Fig. 7 - Courbe débit/pression.

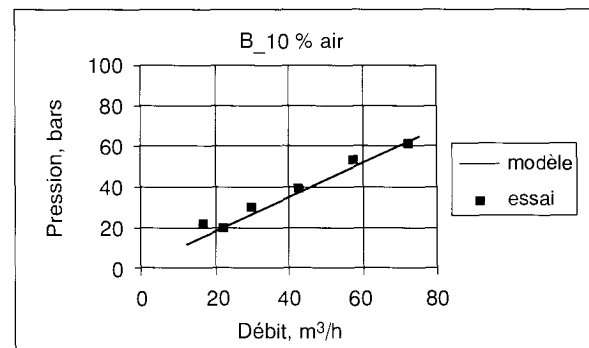
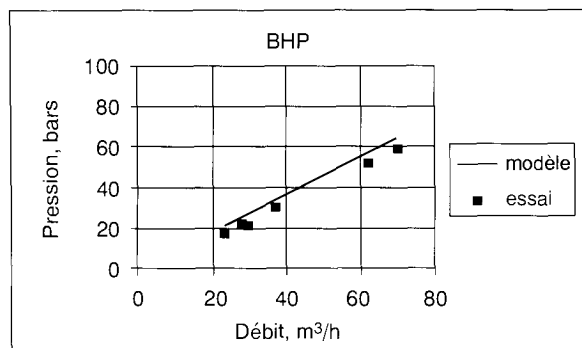
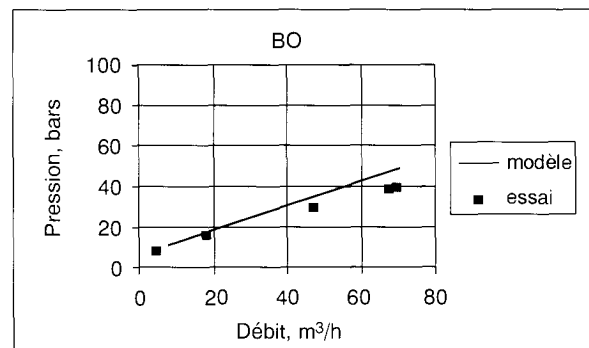
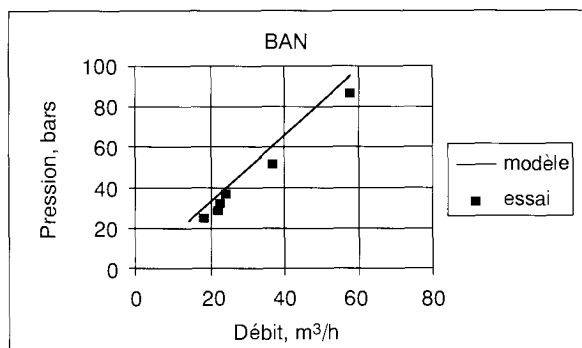


Fig. 8 - Comparaisons entre les courbes expérimentales débit/pression et les prévisions :  
 BAN - béton autonivelant ( $E/L = 0,25$ , affaissement = 27 cm) ;  
 BO - béton ordinaire ( $E/C = 0,53$ , affaissement = 19 cm) ;  
 BHP - béton à hautes performances ( $E/C = 0,33$ , affaissement = 24 cm) ;  
 B\_10%air - béton à air entraîné ( $E/C = 0,4$ , affaissement = 11 cm).

### Comparaison expérience/théorie

La linéarité des profils de pression (fig. 6) enregistrés le long du circuit prouve que, pour les bétons saturés, le frottement béton/tuyau est indépendant de la pression. La seule loi d'interface qui peut satisfaire cette constatation se traduit par l'équation (2). La figure 7 présente une courbe expérimentale typique débit/pression établie dans le circuit de pompage. Cette

relation est linéaire pour 99 % des bétons testés.

La figure 8 montre la comparaison entre les courbes expérimentales débit/pression et les prévisions déduites de la loi d'écoulement du béton dans un tuyau pour quatre bétons différents : béton ordinaire, béton à hautes performances (BHP), béton à air entraîné et béton autonivelant.

### Conclusion

L'essai au tribomètre à cylindres coaxiaux permet de mesurer les propriétés tribologiques de l'interface béton-tuyau. Ces propriétés, injectées dans un calcul simple, conduisent à une évaluation assez précise de l'écoulement du béton dans un circuit de pompage. Ces résultats encourageants doivent être confirmés par un analyse plus approfondie de la totalité des résultats obtenus dans le cadre du projet CALIBE.

### Remerciements.

Les auteurs remercient le projet national CALIBE et, à travers lui, la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques du ministère de l'Équipement) pour leur participation financière aux essais relatés dans la présente note.

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Documentation technique PUTZMEISTER, *Pompe à béton série BSA*.
- [2] ECKARDSTEIN K. (1983), *Béton pompable et pompes à béton - Un manuel pour le pompage du béton*, document technique SCHWING.
- [3] ACI COMMITTEE 304 (1995), Proposed report : Placing Concrete by Pumping Methods, *ACI Materials Journal*, July-August, pp. 441-464.
- [4] HUC. (1995), *Rhéologie des bétons fluides*, Thèse de doctorat de l'École nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche des LPC, Série ouvrages d'art, **OA16**, septembre.
- [5] DE LARRARD F., SZITKAR J.-C., HU C. (1993), Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **186**, juillet-août, pp. 55-59.
- [6] BTRHEOM (1994), *Catalogue « Le matériel des laboratoires des Ponts et Chaussées »*, Fiche technique, novembre.
- [7] BROWNE R., BAMFORTH P. (1977), Tests of Establish Concrete Pumpability, *ACI Journal*, May, pp. 193-203.
- [8] VASILIEV B. (1953), Régimes d'écoulements des bétons dans la tuyauterie, *Stroitel'naja Promichlennost*, **7**.
- [9] DJELAL C. (1991), *Analyse du phénomène de frottement des mélanges eau-argile concentrés contre des surfaces métalliques*, Thèse de doctorat à l'Institut national des sciences appliquées de Rennes, n° d'ordre **D 91-10**, octobre.

