Pression interstitielle dans les bétons frais

Evolution des surpressions interstitielles dans les pâtes et les bétons dès la fin de la mise en œuvre.

Gérard Bernier

Département Génie Civil Ecole Normale Supérieure de Cachan 61, Ave du Pdt Wilson 94 235 Cachan cedex bernier@dgc.ens-cachan.fr

RÉSUMÉ. Le comportement rhéologique des bétons frais doit être maîtrisé pour une bonne mise en œuvre des nouveaux matériaux tels que les bétons autoplaçants. En partant du postulat que le statut de l'eau dans le mélange joue un rôle majeur, nous avons étudié l'évolution des pressions interstitielles pour différentes compositions. Ainsi ont été regardés quelques aspects physiques et chimiques en faisant varier la concentration en solide et la nature des fines, la présence d'un retardateur, de fluidifiants, et d'un viscosant.

ABSTRACT. Rheological behavior of fresh concretes must be controlled to allow a good setting of new materials such as selfplacing concretes. Beginning with the idea that water in the fresh concrete mix has a great importance, we have studied the evolution of pore water pressure for different compositions. Thus, some physical and chemical aspects were looked at while varying the concentration in solid and the nature of fines, the presence of retarder, thinner and viscosity agent.

MOTS-CLÉS : pression, pression interstitielle, béton, béton autoplaçant, adjuvant, fluidifiant, agent viscosant, BAP, poussée.

KEYWORDS: pressure, pore water pressure, concrete, selfplacing concrete, additive, thinner, vis-cosity agent, upthrust.

1. Le postulat

L'étude de la rhéologie des bétons autoplaçants s'avère complexe car le matériau multiphasique possède plusieurs échelles d'analyse (depuis la taille de la molécule d'eau jusqu'à celle du gravier) et des évolutions extrêmement rapides.

En partant du principe que les phénomènes aux échelles inférieures peuvent avoir des effets macroscopiques, nous avons étudié le statut de l'eau dans le milieu. Certes bien d'autres phénomènes à des échelles supérieures interviennent et ne sont sans doute pas négligeables (frottements, blocages locaux etc...). Le postulat posé est le suivant :

"Tant que l'eau suspend de la fraction granulaire la plus fine, l'écoulement est possible"

Autrement dit, si la pression interstitielle de l'eau entre les grains se dissipe peu le matériau est susceptible d'offrir un minimum de résistance au cisaillement donc doit pouvoir s'écouler.

2. Première approche, approche globale.

L'évolution des pressions de la phase interstitielle est conditionnée par deux paramètres : la perméabilité du milieu et la viscosité du fluide.

Ces deux paramètres offrent deux voies de formulation qui ont été abordées de manière empirique pour les BAP à savoir :

- soit la perméabilité est diminuée par ajout de fines (cendres,...)
- soit la viscosité de l'eau est augmentée avec un agent viscosant.

Bien évidemment, dans les deux cas, les fines cimentaires sont défloculées. A partir d'essais de drainage, les perméabilités de deux bétons BN (normal non défloculé E/C = 0,65) et BAP (avec un agent viscosant E/C = 0,75) sous 30kPa (Andriamanantsilavo, 2003) donnent respectivement 2.10^{-7} et 10^{-7} m.s⁻¹. On observe donc que le BAP, bien que plus dosé en eau, possède une perméabilité inférieure.

3. Comment mesurer la pression interstitielle?

Comme pour toute mesure, le capteur ne doit pas interférer avec celle-ci. Hors, soit on accède à une pression en surface soit on mesure la pression au cœur du matériau. Avec un capteur à membrane métallique équipée de jauges, ou à déformations compensées par une contre pression (Andriamanantsilavo, 2003) on accède aux pressions en surface de coffrage. Avec un capteur tensiométrique à céramique poreuse on peut avoir accès aux pressions au coeur du matériau (*cf.* figure 1).

Nous nous situerons dans ce dernier cas afin d'éliminer les effets liés à la présence des parois qui modifient la perméabilité locale du matériau par effet de paroi.

Pression interstitielle dans les bétons frais 3



Pour le capteur à céramique poreuse la réponse est déphasée par rapport à la pression externe comme le montre la figure 2. La perméabilité de la céramique est la cause de ce déphasage. Ici les céramiques utilisées possèdent une grande perméabilité k=5.10-7cm.s⁻¹. Dans le cadre de l'essai (*cf.* figure 2), la mise en pression d'eau (soit 2,75kPa) a été effectuée en moins de 5 secondes (Sayed-Ahmad, 2005).



Figure 2. Caractérisation de l'inertie de la céramique : évolution relative de la pression interstitielle mesurée dans l'eau, en fonction du temps.

4. Pression totale et pression interstitielle.

Lors d'essais sur des colonnes de béton de 80cm de hauteur, on observe que la pression totale, celle qui s'exerce sur le coffrage, est voisine de la pression interstitielle (Lazar, 2002, Long, 2003).



Figure 3. Géométrie du dispositif de mesure des pressions

Les figures 3 et 4 donnent les conditions d'essais et les résultats de mesure. Elles montrent que la pression exercée par le béton (BO E/C = 0,5) sur le coffrage est plus faible que la pression exercée par le fluide interstitiel mesuré à cœur. Si le squelette participe à la poussée sur le coffrage, c'est pour une fraction négligeable. L'écart observé peut être expliqué par l'effet de paroi qui facilite le drainage de l'eau vers la surface.



Figure 4. Evolution des pressions interstitielle et totale dans un béton ordinaire *E/C*=0.5

On notera que, lors du remplissage du coffrage qui a duré environ 5mn, la pression interstitielle lue possède un retard de 20 à 30 secondes sur la pression totale et que celle-ci se dissipe très rapidement dans les premières secondes après arrêt d'introduction du béton. Quand la colonne est complète la pression décroît rapidement dans un premier temps puis plus lentement par la suite. La pression correspondant à la hauteur de la colonne d'eau ne se retrouve qu'après 3 heures environ.

5. Comparaison de l'évolution des pressions dans un BO et BAP (pressions totales et pressions interstitielles)

La figure 5 montre l'évolution des pressions, dans les mêmes conditions d'essai, pour deux bétons (BO : E/C = 0,5 et un BAP) (*cf.* tableau 1) (Lazar, 2002).



Figure 5. Evolutions des pressions interstitielles et totales pour deux bétons

On observe le même décalage entre la pression totale et la pression interstitielle pour le BAP que pour le BO. Mais l'évolution des pressions est beaucoup plus lente. Par ailleurs, lors du chargement qui a duré le même temps dans les deux cas, les ressauts liés à la dissipation des pressions interstitielles ne sont pas visibles. La perméabilité du milieu, plus chargé en fines défloculées, ne permet pas une consolidation aussi rapide que pour le BO.

La seule prise en compte du phénomène de consolidation avec un coefficient de consolidation constant ne permet pas de valider cette évolution. En effet la résolution de l'équation différentielle des surpressions interstitielles qui s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Avec :

-z l'ordonnée du point et H la hauteur du béton (z = 0 à la surface libre du béton)

-u = u(z, t), la surpression interstitielle à la profondeur z au temps t

 $-C_v$ Coefficient de consolidation

Et les conditions aux limites suivantes :

 $-\frac{\partial u}{\partial z}(z,\infty) = 0$: surpressions totalement dissipées pour un temps infini

-u(0,t) = 0: surpressions nulles à la surface quelque soit le temps

 $-u(z,0)=u_0\frac{z}{H}$ avec $u_0=(\rho_{\rm b\acute{e}ton}-\rho_{\rm eau})gH$ au temps t=0 : surpressions proportionnelles à la profondeur

$$u(z,t) = \frac{8u_0}{\pi^2} \sum_{k>0} \frac{(-1)^k}{(2k+1)^2} e^{\frac{(2k+1)^2 \pi^2 C_v}{4H^2} t} \sin\frac{(2k+1)\pi z}{2H}$$

Comme le montre la figure 6 l'évolution des surpressions interstitielles normées $\frac{u(H,t)}{u(H,t_0)}$ pour deux formules de béton ne peut être seulement l'effet de la consolidation.



Figure 6. Evolution des surpressions interstitielles normées calculées et mesurées.

Nous allons systématiquement rechercher les paramètres de formulation qui influent sur l'évolution des surpressions interstitielles.

6. Paramètres de formulation contrôlant la dissipation des surpressions interstitielles

Plusieurs paramètres ont été étudiés :

- La concentration en solide (Fillers seuls 20%, 40%, 50% en volume)

- L'activité chimique de la fraction solide (Fillers, ciment, ciment retardé) pour une même concentration solide

- La présence et la nature du fluidifiant
- La présence d'un agent viscosant dans une pâte défloculée
- L'effet des granulats introduits dans une pâte autoplaçante (BAP)

Les évolutions des pâtes et bétons ont été suivies pendant plusieurs heures. Dans le cadre des BAP nous fournissons les résultats limités aux premières dizaines de minutes qui correspondent à la durée de mise en œuvre.

Pour les pâtes, les tests ont été réalisés dans des tubes de 3cm de diamètre, la canne de mesure étant plongée à l'intérieur. Pour les bétons les mesures ont été faites dans des moules de 16cm de diamètre et 32cm de hauteur, la canne arrivant par le fond du moule.

6.1. Concentration en solide

Trois concentrations en fillers 20, 40 et 50% ont été testées. Les résultats sont fournis par la figure 7.



Figure 7. Evolution des surpressions interstitielles normées calculées en fonction de la concentration solide.

On observe que, pour des concentrations faibles, l'évolution des pressions suit une loi de consolidation, en revanche pour des concentrations correspondant à celles des pâtes de ciment (E/C = 0.5 correspond en à une concentration solide de 40%) l'évolution s'éloigne d'autant plus du modèle que la concentration est élevée.

6.2. Effet physicochimique

L'activité chimique a été regardée en comparant, à concentration solide identique (40%) une pâte de fillers calcaires, une pâte de ciment, et une pâte de ciment retardé (*cf.* figure 8) (*cf.* tableau 3)



Figure 8. Effets physicochimiques sur la dissipation des surpressions interstitielles de pâtes contenant 40% de solides.

Au vue de ces courbes, si le retardateur n'a que le seul effet chimique, le fait de bloquer l'activité du ciment réduit très largement la dissipation des surpressions interstitielles. Ceci a été suggéré par Josserand (Josserand, 2002).

6.3. Effet de la présence et de la nature du fluidifiant.

Les concentrations en solide de 40%, ici le ciment (CEMI 52,5 Le Teil) ont été conservées. Deux fluidifiants, un naphtalène sulfonate et le glénium 27, ont été comparés à une pâte de ciment non adjuvantée. Comme le montre la figure 9, les vitesses de dissipation des surpressions interstitielles sont largement diminuées par la présence des fluidifiants.

La défloculation plus ou moins prononcée du ciment en présence d'un fluidifiant modifie la dimension des espaces inter-grains et en conséquence la perméabilité du milieu.



Figure 9. Comparaison des dissipations des surpressions interstitielles en présence de fluidifiants pour des pâtes de ciment concentrées à 40% (E/C=0.5)

Il ne faut pas oublier que les fluidifiants ont aussi un effet retardant qui peut donc participer au titre de l'action chimique.

6.4. Effet de l'agent viscosant.

Ici pour une même pâte fluidifiée à 1% de glénium 27 et possédant une concentration solide de 40%, trois concentrations en agent viscosant ont été testées (0, 0.5 et 1% de Foxcrete : amidon modifié).

La figure 10 montre que l'agent viscosant diminue les vitesses de dissipation des surpressions interstitielles. Même si la variation de la viscosité de l'eau, en présence de l'agent viscosant n'est pas sensible, ici, pour des pâtes défloculées de faible perméabilité, un dosage minime en agent viscosant permet de modifier sensiblement la dissipation des surpressions interstitielles.





L'augmentation de pression puet paraître surprenante dans un premier temps, mais cela correspond au temps de retard de la mesure du capteur qui est d'autant plus grand que la mobilité de l'eau est faible.

6.5. Effet des granulats sur l'évolution des pressions interstitielles.

Pour conclure sur les dissipations des pressions interstitielles, il reste à montrer l'influence de la présence de granulats. Ceux-ci ont un double effet, une augmentation de la masse volumique du milieu donc des pressions interstitielles et la modification de l'écoulement potentiel de l'eau en introduisant des surfaces donc des effets de parois au voisinage de chaque granulat.





Les courbes de la figure 11 montrent effectivement des vitesses de dissipations des surpressions interstitielles différentes pour la pâte auto plaçante (PAP) et le béton autoplaçant (BAP) dont les formulations se trouvent dans le tableau 4.

Il faut préciser ici que les essais n'ont pas été réalisés dans les mêmes conditions, volume de moule et mode de prise de pressions interstitielles mais les profondeurs de mesure sont restées identiques (PAP cylindre de 3cm et mesure par le dessus, BAP cylindre de 16cm et mesure par le fond).

Enfin la figure 12 montre à très court terme l'évolution des surpressions interstitielles pour deux bétons de formulation strictement identique, l'un simplement fluidifié, l'autre possédant un agent viscosant (*cf.* tableau 4). On observe que, l'agent viscosant agissant à l'échelle de la pâte joue encore un rôle sensible à très court terme sur le béton autoplaçant.



Figure 12. Evolutions comparées des surpressions interstitielles pour un béton fluidifié avec et sans agent viscosant.

7. Conclusions

Le postulat posé, à savoir que le statut de l'eau joue un rôle important sur le comportement des bétons à très court terme semble être validé. On a montré que non seulement la défloculation joue un rôle majeur mais aussi que les aspects chimiques sont loin d'être négligeables à très court terme et que la présence de l'agent viscosant, à dosage faible et ne modifiant pas la viscosité de l'eau de manière mesurable, retarde la dissipation des surpressions interstitielles dans le BAP étudié.

Même si le paramètre "dissipation des surpressions interstitielles" ne garanti aucunement le caractère autoplaçant, il n'en demeure pas moins essentiel car il conditionne l'aptitude à l'écoulement du matériau après un temps de repos ou quand les vitesses de déformation deviennent faibles. La stabilité des pressions interstitielles est une condition nécessaire et non suffisante, en effet toute les composantes granulaires et les proportions de chacune d'elles sont importantes.

A. Tableau des formulations

Bétons	Sable	Gravier	Ciment	Filler	Eau	Optima 100	Foxcrete
BO	580	1195	332	76	217		
BAP	937	833	312	104	208	3,64	0,21

Tableau 1. Formulation des bétons (en kg)

Pâtes fillers	Fraction solide	E/F	F	E
P1	20%	1,5	532	798
P4	40%	0,56	1073	600
P8	50%	0,37	1335	494

Tableau 2. Formulationdes pâtes de fillers (en g)

Pâtes	E/C	C	E	Foxcrete	Glénium 27	Retardateur
P9	0,5	1216	608	-	-	-
P11	0,5	1216	608		12	
P15	0,5	1216	596			12
P22	0,5	1216	560		61	
P25	0,5	1216	548	12	61	
P26	0,5	1216	554	6	61	

Tableau 3. Formulation des pâtes de ciment (en g), % solide à 40%

Bétons	Sable	Gravier	Ciment	Filler	Eau	Glénium 27	Foxcrete
Béton	975	800	280	150	190	5	-
fluide							
BAP	975	800	280	150	190	5	2,6

Tableau 4. Formulation des bétons fluides (en kg)

B. Bibliographie

- Andriamanantsilavo N., Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, Lorient, 2003.
- Josserand L., Ressuage des bétons hydrauliques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- Lazar P., Caractérisation des bétons auto-plaçants, Rapport de dea matériaux, intégrité des structures dans leur environnement, LMT, CNRS, PARIS VI, Cachan, 2002.
- Long W.-J., Caractérisation des bétons auto-plaçants, Rapport de dea matériaux, intégrité des structures dans leur environnement, LMT, CNRS, PARIS VI, Cachan, 2003.
- Sayed-Ahmad F., Pressions interstitielles dans les bétons aux jeunes âges, Rapport de master 2 parcours génie civil, Département Génie Civil, ENS Cachan, 2005.

ANNEXE POUR LE SERVICE FABRICATION A FOURNIR PAR LES AUTEURS AVEC UN EXEMPLAIRE PAPIER DE LEUR ARTICLE ET LE COPYRIGHT SIGNE PAR COURRIER LE FICHIER PDF CORRESPONDANT SERA ENVOYE PAR E-MAIL

- 1. ARTICLE POUR LES ACTES : AUGC'06 - La Gande Motte - 1-2 juin 2006
- 2. AUTEURS : Gérard Bernier
- 3. TITRE DE L'ARTICLE : Pression interstitielle dans les bétons frais
- 4. TITRE <u>ABRÉGÉ</u> POUR LE HAUT DE PAGE <u>MOINS DE 40 SIGNES</u> : Pression interstitielle dans les bétons frais
- 5. Date de cette version : 5 avril 2006
- 6. COORDONNÉES DES AUTEURS :
 - adresse postale :

Département Génie Civil Ecole Normale Supérieure de Cachan 61, Ave du Pdt Wilson 94 235 Cachan cedex

bernier@dgc.ens-cachan.fr

- téléphone : 01 47 40 74 79
- télécopie : 01 47 40 74 65
- e-mail : bernier@dgc.ens-cachan.fr
- 7. LOGICIEL UTILISÉ POUR LA PRÉPARATION DE CET ARTICLE : LATEX, avec le fichier de style article-hermes.cls, version 1.2 du 03/03/2005.
- 8. FORMULAIRE DE COPYRIGHT : Retourner le formulaire de copyright signé par les auteurs, téléchargé sur : http://www.revuesonline.com

SERVICE ÉDITORIAL – HERMES-LAVOISIER 14 rue de Provigny, F-94236 Cachan cedex Tél : 01-47-40-67-67 E-mail : revues@lavoisier.fr Serveur web : http://www.revuesonline.com