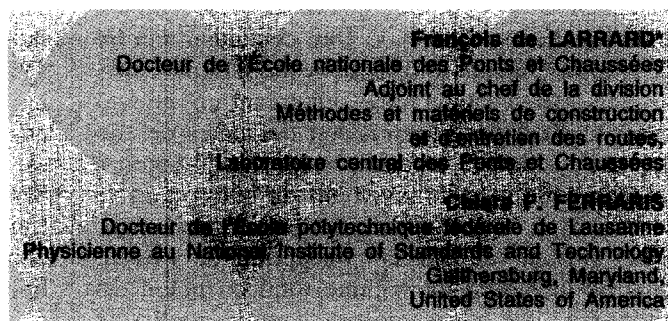


Rhéologie du béton frais remanié

I - Plan expérimental et dépouillement des résultats



RÉSUMÉ

Cet article présente les résultats d'un programme expérimental traitant de la rhéologie du béton frais. Près de 80 mélanges (mortiers et bétons, sans ou avec superplastifiant) ont été formulés et testés. Les caractéristiques rhéologiques des mélanges ont été mesurées avec le rhéomètre *BRHEOM*, en parallèle avec des essais au cône d'Abrams. Il apparaît que la relation entre couple et vitesse de rotation du rhéomètre n'est pas strictement linéaire. Une description plus fine du comportement du matériau est fournie par le modèle de Herschel-Bulkley, de la forme $\tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b$, où τ est la contrainte de cisaillement, $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse imposé à l'échantillon, τ_0 , a et b des paramètres caractéristiques du béton testé. Entre autres avantages, cette nouvelle approche permet d'éviter le problème des seuils négatifs, rencontré avec le modèle de Bingham. Pour un certain nombre d'applications, on peut cependant conserver l'approche de Bingham, à condition de changer le mode d'exploitation de l'essai au rhéomètre.

MOTS CLÉS : 32 - Rhéologie - Béton frais - Mélange - Mortier - Béton hydraulique - Superplastifiant - Formulation - Essai - Mesure - Caractéristiques - Appareil de mesure - Slump test.

Introduction

La rhéologie du béton frais est une science relativement jeune. En effet, les bétons relevant d'une telle approche, c'est-à-dire suffisamment fluides, sont d'emploi assez récent. D'autre part, on s'est contenté longtemps d'une approche technologique, consistant à soumettre un échantillon de béton à une sollicitation plus ou moins contrôlée, et à en tirer un indice (hauteur d'affaissement, temps d'écoulement, compacité, etc.) permettant de classer les mélanges en terme de maniabilité. Le fait que les classements obtenus avec différents essais ne coïncident pas entre eux montre les limites d'une telle approche.

Tattersall (1991) a été l'un des pionniers de la rhéologie du béton frais, en proposant, au moyen d'un malaxeur instrumenté, une caractérisation plus complète de l'écoulement de ce matériau. Il a proposé de décrire le comportement du béton frais au moyen du modèle de Bingham, de la forme :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

où τ est la contrainte de cisaillement appliquée au matériau, $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse (appelé aussi vitesse de cisaillement), τ_0 le seuil de cisaillement (en Pa), et μ la viscosité plastique (en Pa.s). Les deux derniers grandeurs (paramètres de Bingham) caractérisent les propriétés d'écoulement du matériau. Cependant, l'appareil

* Cette recherche a été effectuée pendant le séjour de F. de Larrard au National Institute of Standard and Technology, en qualité de chercheur invité.

de Tatersall étant le siège d'un champ de vitesse inconnu, et certainement complexe du fait de l'absence de symétrie, cet auteur en est resté à une description analogique du comportement du matériau, au moyen de la relation entre le couple résistant et la vitesse de rotation des pales.

La même approche a été adoptée par Wallevik, qui a cherché à améliorer l'appareil de Tatersall en revenant à la géométrie, plus classique, du viscosimètre à cylindres coaxiaux (viscosimètre BML [Wallevik, 1990]). C'était cependant perdre de vue les raisons qui avaient présidé au choix de Tatersall, à savoir lutter, en créant un mouvement vertical par l'inclinaison des pales de son appareil, contre la tendance naturelle du béton à la ségrégation. Le mouvement du béton dans le viscosimètre BML est essentiellement horizontal. Mais surtout, de par la conception de l'essai, plus de la moitié du volume total du béton est situé dans des zones mortes, dans lesquelles le matériau n'est pas cisailé pendant l'essai. On risque alors de générer une ségrégation par migration des éléments fins depuis les zones mortes jusqu'aux zones cisailées, accompagnée d'un amoncellement de particules grossières dans les zones mortes. On aboutit ainsi à une sous-estimation des caractéristiques rhéologiques, comme on peut s'en rendre compte quand on compare les indications de cet appareil avec celles d'autres rhéomètres de conception différente [Hu, 1995]. Ainsi, l'appareil de Wallevik ne nous semble pas avoir apporté un progrès véritable par rapport à son prédécesseur, mis à part son aspect automatisé et informatisé, qui reflète la technologie des années 1980.

Après analyse des qualités et défauts de ces matériels [Hu et al., 1994], un nouvel appareil, le rhéomètre BTRHEOM, a été développé [de Larrard et al., 1993-1995 ; Hu, 1995]. Conçu à partir de spécifications précises, combinant un ensemble d'exigences scientifiques et pratiques, le rhéomètre présente à notre avis de nombreux avantages au regard des appareils précédents :

- il délivre des grandeurs rhéologiques fondamentales ;
- il peut caractériser le comportement du matériau en régime permanent (appelé « comportement du béton remanié ») ;
- il peut également reconnaître le comportement du béton soumis à une vibration verticale contrôlée ;

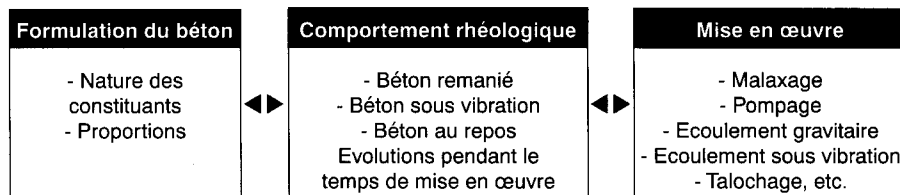
- il permet aussi la mesure du seuil de cisaillement au repos, caractéristique de la thixotropie du matériau ;
- il fournit une évaluation du volume du béton en cours d'essai, lequel permet de remonter à la dilatance ;
- enfin, l'appareil est portable, et, comme tel, utilisable en laboratoire comme sur le chantier.

Au moyen de calculs aux éléments finis et d'essais comparatifs avec tous les rhéomètres existants, Hu a validé le rhéomètre BTRHEOM [Hu, 1995], autant que faire se peut. Il apparaît que les paramètres de Bingham sont entachés d'une erreur ne dépassant pas 10 % en moyenne, ce qui est satisfaisant pour un essai de ce type. Les bases de l'appareil étant consolidées, il restait à l'utiliser de façon intensive pour avancer dans la connaissance de la rhéologie des bétons, et améliorer par ce moyen la pratique industrielle.

Il a déjà été montré que le rhéomètre était un outil précieux pour le suivi rhéologique des bétons [de Larrard et al., 1996b], permettant non seulement de mettre en évidence les pertes de maniabilité avec un seul échantillon, mais également d'émettre un diagnostic sur les causes de cette évolution, qu'elles soit liées à l'absorption d'eau par les granulats ou à une incompatibilité ciment/adjuvant [Huyn, 1996]. Cependant, pour que l'approche rhéologique devienne partie intégrante de l'ingénierie du matériau béton, il faut encore combler deux grandes lacunes (fig. 1) :

① Tout d'abord, il faut comprendre comment le comportement du matériau intervient dans les différentes phases de mise en œuvre. Cet objectif est actuellement poursuivi dans le cadre du projet national CALIBE, sujet « Maîtrise du pompage des bétons », dans lequel on conduit des recherches afin de pouvoir à terme prédire la relation pression-débit pour un circuit de pompage donné, au moyen de la description rhéologique du matériau. Il serait également intéressant de vérifier, par des essais *ad hoc*, que la connaissance du seuil de cisaillement permet de prévoir la stabilité des pentes en béton frais [Hu, 1995]. On pourrait encore, dans la même veine, établir des conditions sur les caractéristiques rhéologiques permettant de vidanger une benne à béton dans un délai donné, en procédant à des calculs aux éléments finis du même type que ceux mis en œuvre par des chercheurs japonais [Tanigawa et Mori, 1989 ; Tanigawa et al., 1991].

Fig. 1 -
Lacunes à combler
afin de rendre le rhéologie des bétons véritablement utilisable par l'ingénieur



② Ensuite (ou en parallèle), il faut s'efforcer de relier la rhéologie du béton frais avec sa composition. C'est l'objet de la présente recherche. Lorsque ces deux buts auront été atteints, l'ingénieur pourra, dès le stade de la conception du matériau, prendre en compte les différentes phases d'utilisation, de façon à parvenir très vite à la meilleure adéquation possible entre matériau, méthodes de mise en œuvre et structure.

But de la recherche

Dans ce premier article, on présente les caractéristiques des constituants utilisés, le plan expérimental suivi (qui a consisté à fabriquer et à tester 78 mortiers et bétons) et le dépouillement des résultats bruts, à la suite duquel on propose une nouvelle relation entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse pour décrire l'écoulement du béton frais.

On analyse ensuite dans le deuxième article intitulé « Relation entre composition et paramètres rhéologiques » les données rhéologiques au regard de la composition des bétons, et on construit des modèles pour la viscosité plastique et le seuil de cisaillement. Ces expressions sont destinées à être intégrées dans un logiciel d'aide à la formulation des bétons, susceptible de fournir une cartographie de l'univers des bétons modernes, tout en accélérant le travail du formulateur.

Enfin, le troisième article intitulé « L'essai au livre d'Abrams modifié » traite d'une adaptation de l'essai au cône d'Abrams, visant à fournir une évaluation expérimentale des paramètres de Bingham par un essai simple, bon marché et facilement utilisable en contrôle de la qualité. Cet essai n'a pas pour ambition de remplacer le rhéomètre BTRHEOM, mais plutôt de répandre et de faciliter l'accès aux données rhéologiques, notamment dans le cas des bétons à hautes performances pour lesquels l'essai d'affaissement classique est particulièrement insuffisant.

Constituants

Granulats

Le granulats principal utilisé dans cette recherche est un silico-calcaire alluvionnaire de la région de Washington D.C. (USA), de forme assez arrondie. Les deux tailles (sable 0/4 et gravillon 4/10) ont une densité réelle (à sec) de 2,61. Les absorptions d'eau respectives valent 0,6 et 0,7 %, et les

compacités à sec (mesurées selon le mode opératoire* donné dans la référence [Sedran et de Larrard, 1994]) 0,715 et 0,642. Afin de modéliser plus finement la contribution du sable à la compacité des mélanges, la compacité de trois fractions granulaires du sable a été mesurée. Elle est de 0,625 pour la fraction grossière (1,25/4), 0,621 pour la fraction moyenne (0,315/1,25) et 0,581 pour la fraction la plus fine (0,125/0,315). Pour les mortiers, le sable a été tamisé à 2,5 millimètres. Enfin, pour assurer une continuité de la granularité des mélanges, un sablon roulé siliceux d'Ottawa (Illinois, USA) quasi-homométrique (densité 2,65, absorption d'eau 0 %, compacité 0,659) a permis de corriger les sables alluvionnaires. Les courbes granulaires des matériaux sont données sur la figure 2.

Ciment

Un ciment Portland type I/II (selon les normes ASTM) de l'usine Lehigh d'Allentown, de densité absolue 3,15, a été utilisé pour tous les essais. Sa classe vraie est de 62 MPa à 28 jours. La composition chimique apparaît dans le tableau I, et sa granulométrie (mesurée dans l'alcool au granulomètre à laser) est donnée sur la figure 3. La compacité, calculée à partir de l'essai de demande en eau décrit par Sedran et de Larrard (1994), est de 0,565 sans adjuvant, et de 0,606 en présence de 1 % de superplastifiant (en extrait sec par rapport à la masse de ciment).

Fumée de silice

Il s'agit d'une fumée de silice Elkem fournie sous forme de barbotine, contenant une proportion pondérale solide de 54 %. La densité absolue a été prise égale à 2,2. La granulométrie mesurée au sédigraphe, en présence d'eau de chaux et de 4 % de superplastifiant, montre la grande finesse de ce produit qui présente un passant de 77 % à 0,25 μm (fig. 3). La composition chimique de la fumée de silice est donnée dans le tableau I.

Superplastifiant

Un naphthalène sulfonate en solution aqueuse à 40 % d'extrait sec pondéral (nom commercial : DARACEM 19 de la société W.R. Grace) a été utilisé comme superplastifiant dans la moitié des mélanges.

* Masse de 791 g de matériau versée dans un cylindre métallique de diamètre 76 mm, surmontée d'un piston exerçant une pression verticale de 10 kPa, soumis à une vibration d'une minute, de fréquence 60 Hz, d'amplitude maximale, avec une table vibrante SYNTROM - FMC - VP 51.

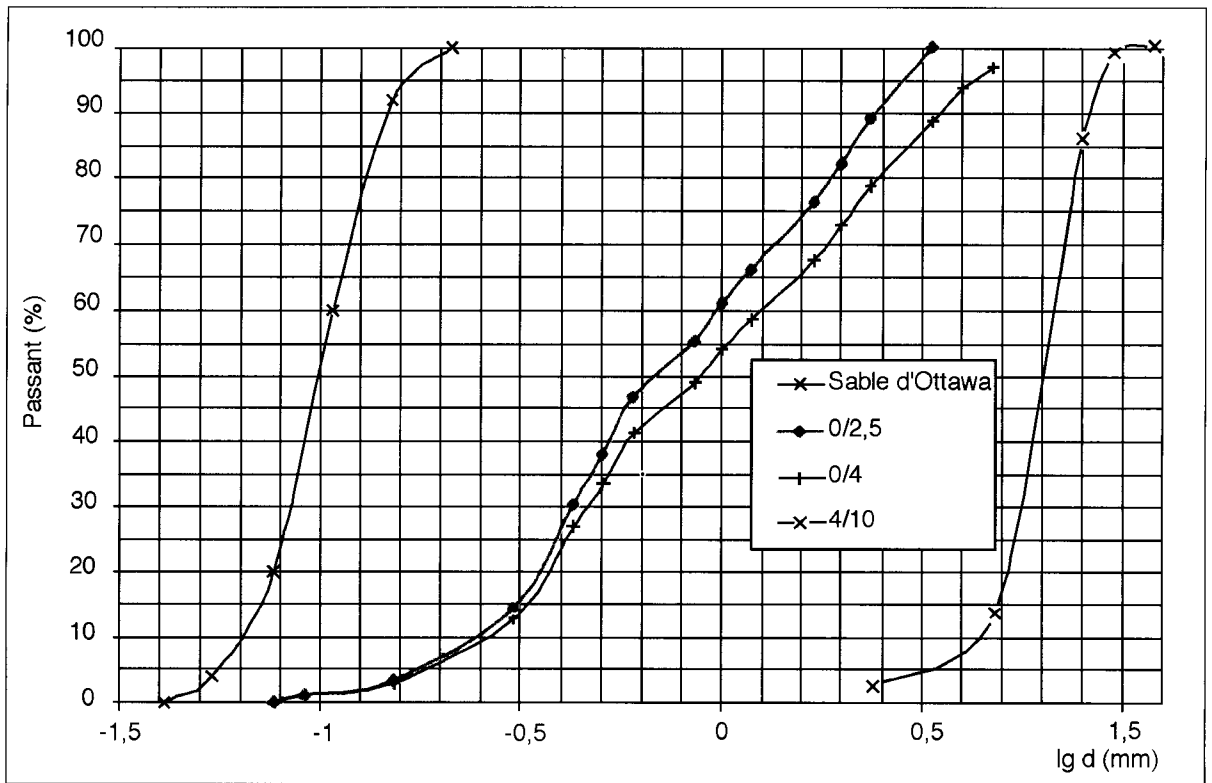


Fig. 2 - Granulométries des granulats utilisés dans les mortiers et bétons.

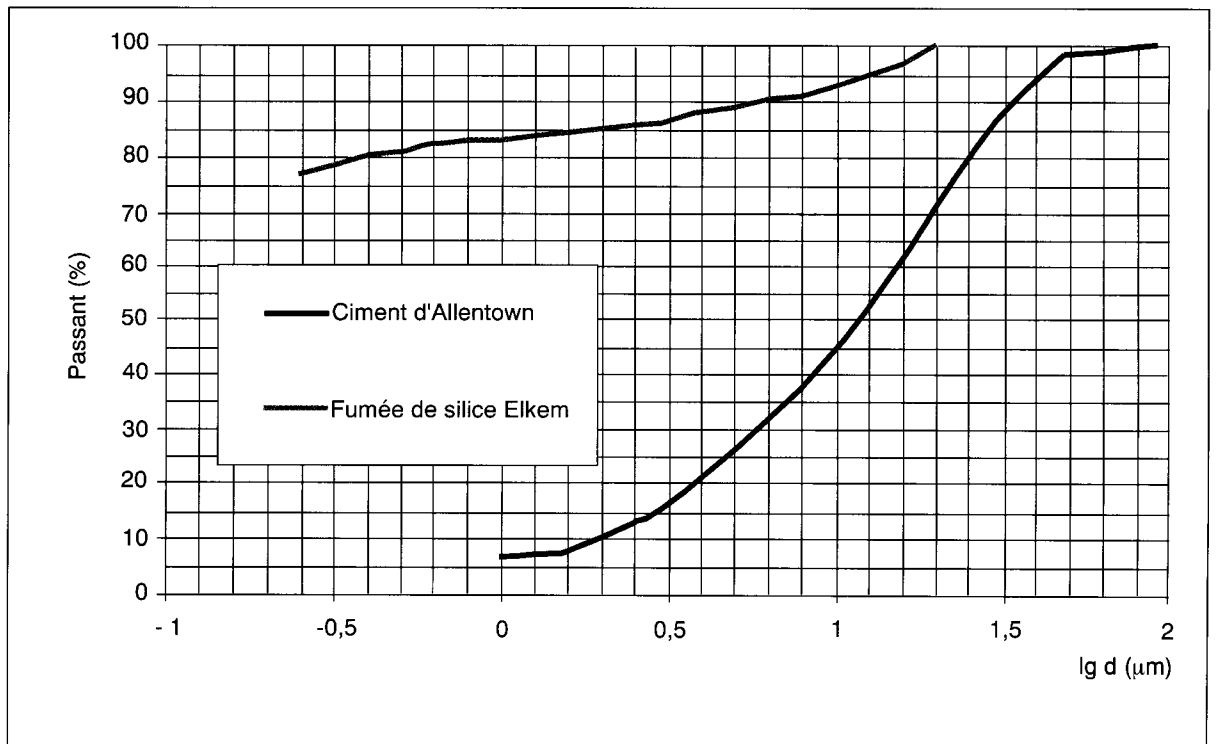


Fig. 3 - Granulométries des liants utilisés dans les mortiers et bétons.

TABLEAU I
Composition chimique du ciment
et de la fumée de silice

	Ciment	Fumée de silice
SiO ₂	21,29	96,68
Al ₂ O ₃	4,42	0,45
TiO ₂	0,22	–
Fe ₂ O ₃	2,87	0,22
CaO	63,83	1,24
MgO	1,78	0,24
Na ₂ O	0,21	0,24
K ₂ O	0,76	0,49
SO ₃	3,03	–
Cl ⁻	0,00	–
S ⁻	0,07	–
Insoluble	0,2	néant
Perte au feu	0,77	
MnO	0,05	0,04
CO ₂	0,62	–
H ₂ O	0,00	
Chaux libre	0,59	
Total	99,50	99,60
Bogue clinker : C ₃ S	56,34 %	
C ₂ S	26,14 %	
C ₃ A	7,71 %	
C ₄ AF	9,81 %	

Modes opératoires

Préparation des bétons et essais courants

Les bétons ont été fabriqués à l'aide d'un malaxeur planétaire Lancaster LWD à axe vertical, d'une capacité maximale de 16 litres. Les granulats ont été séchés préalablement à leur emploi. L'ensemble des matériaux secs était introduit, puis malaxé pendant une minute. L'eau, préalablement additionnée d'un tiers de la dose totale de superplastifiant (pour les mélanges qui en contenaient) était ensuite ajoutée pendant 30 s. Le malaxage était poursuivi pendant 2 min, et la cuve vidée, sauf pour les bétons adjuvantés. Pour ces derniers, la deuxième dose de superplastifiant était versée dans le mélange pendant 30 s, puis la dispersion du produit était atteinte grâce à un malaxage supplémentaire d'une minute. Le temps total de malaxage variait donc de 3 min 30 s (pour les bétons sans adjuvant) à 5 min (pour les bétons avec adjuvant). Pour les bétons aux fumées de silice, la barbotine était ajoutée aux matériaux secs avant le démarrage

du malaxage, sauf pour le mélange le plus riche en fumée de silice (FS 30), pour lequel le produit a été préalablement mélangé à l'eau d'ajout et à la première dose de superplastifiant.

On procédait ensuite à la mesure de la densité du béton frais, par pesée d'un cylindre d'une contenance de 2 l, rempli, piqué et arasé selon la norme ASTM C138-92. On considère cette mesure comme indicative. Bien qu'elle permette théoriquement le calcul de la teneur en air du béton frais, on ne peut en attendre la même précision qu'une mesure à l'aéromètre classique. Puis, l'affaissement au cône d'Abrams était ensuite mesuré, en suivant la norme ASTM C143-90, à ceci près que le cône était muni d'un axe vertical, et que la face supérieure du cône était surmontée d'un disque glissant sur l'axe (cf. troisième article de la présente série). Comme on le verra, l'effet de ces modifications sur l'affaissement final s'est avéré négligeable.

Essais au rhéomètre BTRHEOM

Le plan expérimental visait à effectuer une reconnaissance quasi-exhaustive de tous les mélanges possibles des constituants choisis. On s'attendait donc, pour un certain nombre de compositions, à rencontrer des problèmes de ségrégation. C'est pourquoi on a choisi un mode opératoire d'essai au rhéomètre susceptible de minimiser ce risque. Après remplissage de l'appareil, on procédait donc à une pré vibration d'une durée de 15 s (fréquence 40 Hz). Puis la rotation des pales était déclenchée jusqu'à une vitesse maximale de 0,8 t/s. Cette vitesse diminuait alors en 4 pas distribués à peu près uniformément sur l'intervalle 0,8-0,2 t/s. On obtenait finalement 5 mesures de couples correspondant aux vitesses imposées, caractéristiques du comportement du béton sans vibration. En raison du caractère pathologique d'un certain nombre de mélanges, on a renoncé à pratiquer des essais sous vibration, dont l'interprétation aurait été hasardeuse, au moins pour certains mélanges. À la fin de chaque essai au rhéomètre, on notait l'aspect de la surface horizontale. On procédait, en affectant une note de 0 à 3, à une appréciation qualitative du ressuage et de la ségrégation par remontée des gravillons.

Avant chaque essai relatif à un mélange donné, on pratiquait un essai en présence d'eau, afin de mesurer la contribution du joint au couple global mesuré. La correction de l'essai béton était ensuite effectuée automatiquement par le logiciel de contrôle et d'acquisition de données ADRHEO, selon le protocole présenté dans la référence par de Larrard et *al.*, (1996b).

Plan expérimental

Le plan expérimental a consisté à caractériser de façon systématique l'ensemble des mélanges faisables à partir des trois matériaux de base : gravillon, sable corrigé (mélange de sable alluvionnaire et de sablon à proportions fixées) et ciment. À partir d'un certain nombre de compositions sèches, on déclinait trois mélanges humides, en variant le rapport eau/solide, de façon à parcourir la gamme des consistances caractérisables par le rhéomètre. La limite inférieure se rencontrait pour des affaissements voisins de 10 cm pour les mélanges sans adjuvant [Hu et al., 1994], alors que la limite supérieure était atteinte lorsque le ressuage ou la ségrégation devenaient excessifs.

Bétons ordinaires

Dans cette série, on a utilisé tous les constituants présentés à l'exception du superplastifiant. Le mélange central a été calculé à l'aide du logiciel René-LCPC version 5 [Sedran et de Larrard, 1994], comme proche de celui donnant la compacité à sec maximale, avec cependant un léger excès de ciment (ceci afin de minimiser le ressuage dans tous les mélanges sous-dosés en fines). C'est en particulier l'optimisation de la compacité à dosage en ciment fixé qui a conduit à adopter une proportion sable fin/sable alluvionnaire de 30 %, valeur conservée ensuite dans toute cette série. Les autres mélanges secs ont été générés à partir de ce mélange central, par changement des deux paramètres suivants : proportion volumique de ciment, rapport sable/granulat* (fig. 4). À noter que le dernier rapport était de 100 % pour trois combinaisons sèches, correspondant non plus à des bétons, mais à des mortiers. Pour ces mélanges, et pour éviter le ressuage qu'on aurait obtenu avec des dosages en ciment équivalents à ceux des bétons, on s'est traduit d'un pas supplémentaire sur l'axe vertical (relatif à la proportion volumique de ciment) à l'abscisse 100 %. Enfin, la combinaison correspondant au plus faible dosage en ciment et au plus fort dosage en gravillon n'a pas été fabriquée, étant donné les problèmes de stabilité qu'elle aurait inévitablement provoqués.

Pour déterminer les dosages en eau susceptibles de produire les affaissements recherchés, on a commencé par adopter un dosage correspondant à la porosité du système sec (prévue par le logiciel RENÉ-LCPC) additionnée d'un excès d'eau fixe et forfaitaire. Suivant le résultat de l'affaissement obtenu, le dosage en eau était ensuite

diminué ou augmenté, le but final, comme déjà dit, étant d'obtenir trois bétons (ou mortiers) de consistances différentes à partir de chaque combinaison sèche. Ce processus a eu l'avantage de limiter les pertes en matériaux. Par contre, on s'est parfois trouvé aux limites du domaine d'emploi du rhéomètre. Mais la connaissance précise des limites d'applicabilité de l'essai était aussi un objectif de cette recherche. Les compositions des mortiers et bétons obtenus sont données dans le tableau II. En plus des compositions sèches (données en pourcentages massiques), on a indiqué les formulations pondérales rapportées au mètre-cube, dans l'hypothèse où la teneur en air occlus serait de 1 %. À noter qu'on a généré deux bétons de plus pour le mélange central, ce qui portait à cinq le nombre de bétons de composition sèche identique et de consistance variable.

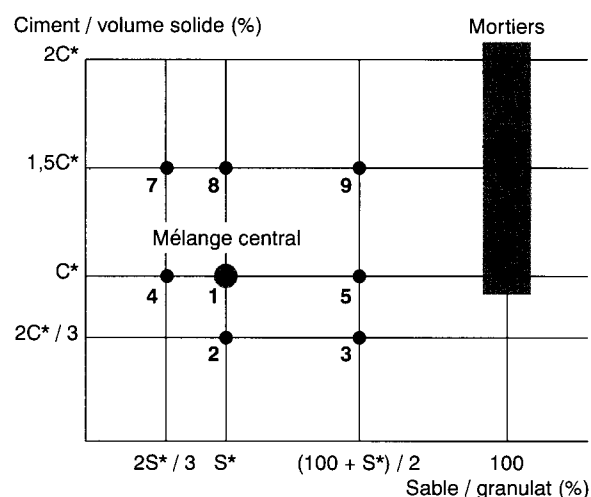


Fig. 4 - Plan expérimental. Mode de calcul des proportions des matériaux secs dans les séries de bétons ordinaires et de bétons adjuvés. Par rapport à cette approche de départ, les dosages en ciment des mortiers (compositions 6-10-11) ont été accrus, afin de limiter le ressuage.

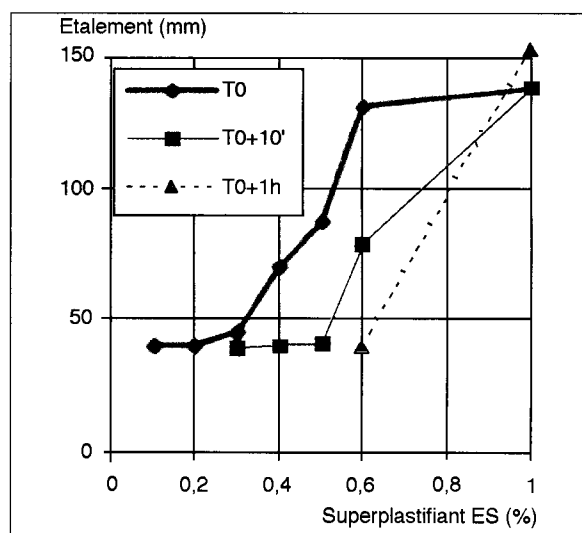


Fig. 5 - Essais au mini-cône d'Abrams sur pâtes pures en présence de superplastifiant. Un étalement de 40 mm (soit le diamètre intérieur du moule) correspond à un affaissement nul.

* ou encore sable/sable + gravillon.

TABLEAU II
Composition des bétons non adjuvantés
 (formulations calculées sur la base d'un volume d'air occlus égal à 1%). En gras : mélange central

Mélanges	% massique solide				Formulation (kg/m ³)						
	Gravillon	Sable	Sablon	Ciment	Gravillon	Sable	Sablon	Ciment	Eau	Eau efficace	e/c
BO1C	45,0	29,0	9,0	17,0	957	617	191	362	210	200	0,553
BO1B'	45,0	29,0	9,0	17,0	952	614	190	360	214	204	0,567
BO1A	45,0	29,0	9,0	17,0	947	611	189	358	218	208	0,581
BO1A'	45,0	29,0	9,0	17,0	943	607	189	356	222	212	0,595
BO1B	45,0	29,0	9,0	17,0	938	604	188	354	226	216	0,610
BO2A	48,0	30,9	9,6	11,4	1 006	648	201	240	215	204	0,850
BO2B	48,0	30,9	9,6	11,4	996	642	199	237	223	212	0,893
BO2C	48,0	30,9	9,6	11,4	986	635	197	235	231	220	0,936
BO3A	24,0	49,3	15,3	11,4	483	993	308	230	244	235	1,020
BO3B	24,0	49,3	15,3	11,4	478	983	305	228	252	243	1,066
BO3C	24,0	49,3	15,3	11,4	473	972	302	226	260	251	1,113
BO4A	57,6	19,3	6,0	17,0	1 207	405	126	356	223	212	0,595
BO4C	57,6	19,3	6,0	17,0	1 201	403	125	354	227	216	0,610
BO4B	57,6	19,3	6,0	17,0	1 194	401	124	352	231	220	0,624
BO5A	22,5	46,2	14,3	17,0	460	944	293	347	240	231	0,666
BO5B	22,5	46,2	14,3	17,0	455	934	290	344	248	239	0,696
BO5C	22,5	46,2	14,3	17,0	450	925	287	340	256	247	0,727
BO6C	0,0	63,4	19,7	17,0	0	1 207	375	323	291	284	0,877
BO6B	0,0	63,4	19,7	17,0	0	1 193	370	319	299	292	0,914
BO6A	0,0	63,4	19,7	17,0	0	1 179	366	316	307	300	0,950
BO7C	52,0	17,4	5,4	25,1	1 093	367	114	529	230	220	0,416
BO7A	52,0	17,4	5,4	25,1	1 081	363	113	523	238	228	0,436
BO7B	52,0	17,4	5,4	25,1	1 070	359	111	518	246	236	0,456
BO8C	40,6	26,2	8,1	25,1	851	549	170	527	231	222	0,421
BO8A	40,6	26,2	8,1	25,1	843	543	169	522	239	230	0,440
BO8B	40,6	26,2	8,1	25,1	834	537	167	517	247	238	0,460
BO9A	20,3	41,7	12,9	25,1	413	849	264	512	252	244	0,477
BO9B	20,3	41,7	12,9	25,1	409	840	261	507	260	252	0,498
BO9C	20,3	41,7	12,9	25,1	405	831	258	501	268	260	0,519
BO10C	0,0	57,2	17,7	25,1	0	1 107	344	486	289	282	0,580
BO10B	0,0	57,2	17,7	25,1	0	1 094	340	481	297	290	0,603
BO10A	0,0	57,2	17,7	25,1	0	1 082	336	475	304	298	0,627
BO11A	0,0	51,1	15,9	33,0	0	984	305	635	302	296	0,466
BO11B	0,0	51,1	15,9	33,0	0	973	302	628	310	304	0,484
BO11C	0,0	51,1	15,9	33,0	0	961	298	621	318	312	0,503

Bétons adjuvantés

Dans cette catégorie, on a généré les mélanges secs selon le même principe que pour les mélanges sans adjuvant. Par contre, on a cherché à obtenir une gamme d'affaissements un peu plus élevée, comme c'est le cas dans la pratique industrielle des bétons adjuvantés. On a adopté pour tous les mélanges un pourcentage en extrait sec de superplastifiant par rapport au ciment égal à 1 %. Cette valeur, trouvée à l'issue d'une série de tests de type « mini-affaissement » sur pâte pure ([Tang et Bhattacharja, 1996], fig. 5), est probablement proche de la dose de saturation au sens de la méthode des coulis de l'AFREM [de Larrard et al., 1996a]. Elle a permis de se garantir du risque

de perte de maniabilité rapide, qui aurait pu mettre en cause la répétabilité des essais. On peut également penser qu'elle a assuré une défloculation maximale des grains de ciment dans tous les mélanges, quelle que soit leur composition. Cependant, ce fort dosage en adjuvant a rendu plus fréquente l'apparition d'un ressuage excessif. Par ailleurs, pour les compositions pauvres en ciment comme celles des groupes BHP2 et BHP3, on n'a pu obtenir d'affaissement significatif. Tout se passait comme si l'eau en excès de la porosité du mélange sec sortait du béton au lieu d'écartier les grains et de lubrifier le mélange. Les compositions des mortiers et bétons de cette série sont données dans le tableau III.

TABLEAU III
Composition des bétons adjuvantés (série à 1 % d'extrait sec).
En caractères gras : mélange central

Mélanges	% massique solide				Formulation (kg/m ³)							
	Gravillon	Sable	Sablon	Ciment	Gravillon	Sable	Sablon	Ciment	Super-plastifiant	Eau d'ajout	Eau efficace	e/c
BHP1A	45,0	28,0	8,0	19,0	1 015	632	180	429	10,71	159	155	0,362
BHP1A'	45,0	28,0	8,0	19,0	1 012	630	180	427	10,68	162	158	0,369
BHP1B	45,0	28,0	8,0	19,0	1 009	628	179	426	10,65	164	160	0,376
BHP1B'	45,0	28,0	8,0	19,0	1 006	626	179	425	10,62	167	163	0,383
BHP1C	45,0	28,0	8,0	19,0	1 003	624	178	423	10,59	169	165	0,390
BHP2A	48,4	30,1	8,6	12,8	1 085	675	193	287	7,17	159	152	0,529
BHP2B	48,4	30,1	8,6	12,8	1 079	671	192	285	7,13	164	157	0,550
BHP2C	48,4	30,1	8,6	12,8	1 072	667	191	283	7,08	169	162	0,571
BHP3A	24,2	49,0	14,0	12,8	523	1 058	302	276	6,91	188	182	0,660
BHP3C	24,2	49,0	14,0	12,8	516	1 045	299	273	6,82	198	192	0,705
BHP3C'	24,2	49,0	14,0	12,8	507	1 026	293	268	6,69	213	207	0,775
BHP4C	57,0	18,7	5,3	19,0	1 286	421	120	429	10,72	160	155	0,360
BHP4A	57,0	18,7	5,3	19,0	1 278	419	120	426	10,66	165	160	0,374
BHP4B	57,0	18,7	5,3	19,0	1 270	416	119	424	10,59	170	165	0,388
BHP5A	21,2	43,0	12,3	23,5	468	947	271	519	12,97	182	181	0,349
BHP5B	21,2	43,0	12,3	23,5	465	941	269	516	12,89	187	186	0,361
BHP5C	21,2	43,0	12,3	23,5	462	935	267	513	12,81	192	191	0,373
BHP6A	0,0	56,0	16,0	28,0	0	1 197	342	599	14,97	210	212	0,354
BHP6C	0,0	56,0	16,0	28,0	0	1 173	335	587	14,67	226	228	0,389
BHP6B	0,0	56,0	16,0	28,0	0	1 164	332	582	14,55	232	234	0,402
BHP7C	50,6	16,6	4,7	28,1	1 146	376	107	635	15,89	165	165	0,259
BHP7B	50,6	16,6	4,7	28,1	1 139	373	107	632	15,79	170	170	0,269
BHP7A	50,6	16,6	4,7	28,1	1 132	371	106	628	15,69	175	175	0,278
BHP8C	40,0	24,9	7,1	28,0	904	563	161	634	15,86	166	166	0,262
BHP8B	40,0	24,9	7,1	28,0	899	559	160	630	15,76	171	171	0,271
BHP8A	40,0	24,9	7,1	28,0	893	556	159	627	15,66	176	176	0,281
BHP9C	20,0	40,4	11,6	28,0	442	895	256	621	15,51	183	184	0,296
BHP9A	20,0	40,4	11,6	28,0	440	890	254	617	15,42	188	189	0,306
BHP9B	20,0	40,4	11,6	28,0	437	884	253	613	15,32	193	194	0,316
BHP10C	0,0	49,2	14,1	36,8	0	1 050	300	785	19,63	220	225	0,287
BHP10B	0,0	49,2	14,1	36,8	0	1 039	297	777	19,43	228	233	0,300
BHP10A	0,0	49,2	14,1	36,8	0	1 028	294	769	19,22	236	241	0,313
BHP11C	0,0	42,6	12,2	45,3	0	901	257	957	23,93	235	244	0,255
BHP11B	0,0	42,6	12,2	45,3	0	891	255	947	23,67	243	252	0,266
BHP11A	0,0	42,6	12,2	45,3	0	881	252	937	23,42	251	260	0,278

TABLEAU IV
Composition des bétons adjuvantés (bétons intermédiaires et bétons aux fumées de silice).
***FS : fumée de silice (la masse indiquée concerne la barbotine)**

Mélanges	% massique solide					Formulation (kg/m ³)								
	Gravillon	Sable	Sablon	Ciment	FS	Gravillon	Sable	Sablon	Ciment	FS*	SP	Eau d'ajout	Eau efficace	e/c
80 % BO	45,0	28,8	8,8	17,4		952	609	186	369		2,13	214	205	0,556
60 % BO	45,0	28,6	8,6	17,8		966	614	184	383		4,26	201	194	0,506
40 % BO	45,0	28,4	8,4	18,2		980	618	183	397		6,39	189	182	0,459
20 % BO	45,0	28,2	8,2	18,6		995	623	181	412		8,52	177	171	0,416
FS 7,5	44,2	27,5	7,9	19,1	1,43	1 000	622	178	431	60	14	125	150	0,348
FS 15	43,3	27,0	7,7	19,1	2,87	988	615	176	435	121	17	87	142	0,326
FS 22,5	42,5	26,5	7,6	19,2	4,31	973	605	173	438	183	21	50	136	0,310
FS 30	41,7	25,9	7,4	19,2	5,76	951	592	169	438	244	24	20	136	0,310

Bétons intermédiaires

L'essentiel du programme expérimental étant consacré soit à des bétons sans adjuvant, soit à des bétons fortement adjuvantés, il était intéressant, pour un nombre limité de mélanges, de reconnaître l'effet de dosages intermédiaires. C'est d'ailleurs dans ce domaine, le plus délicat pour le modélisateur, que se rencontre la plupart des bétons industriels d'aujourd'hui. Pour ce faire, on a généré 4 mélanges par simple interpolation linéaire des proportions massiques entre le mélange central sans adjuvant, et son correspondant avec adjuvant. Ainsi, le béton nommé « 80 % BO » correspond à un mélange (en masse) de 80 % du mélange central sans adjuvant, et de 20 % du mélange central avec adjuvant (tableau IV).

Bétons aux fumées de silice

Les bétons aux fumées de silice sont un autre exemple de mélanges intéressants pour le praticien et difficiles à traiter pour le rhéologue, car les fumées de silice, dont les particules sont en majorité plus fines que le micromètre (fig. 3), sont en fait des colloïdes. Cela signifie notamment qu'à leur échelle, les forces de surface peuvent jouer un rôle important, et rendent le comportement *a priori* plus complexe. À titre préliminaire, on a donc généré, à partir du mélange central adjuvanté, quatre derniers bétons avec des dosages croissant par pas de 7,5 % de fumée de silice en proportion du poids de ciment, jusqu'à un maximum de 30 %. Bien sûr, ce dosage est clairement excédentaire pour la plupart des utilisations pratiques de béton à hautes performances. Le but était simplement de balayer une large gamme, et d'obtenir des mélanges dans lesquels les fumées de silice, présentes en quantité, contribueraient significativement à la rhéologie du système. La dose de superplastifiant a été augmentée graduellement à raison de 4 % du poids de fumée de silice, afin de garder un mélange saturé en adjuvant. Les compositions des bétons aux fumées de silice figurent dans le tableau IV.

Résultats - Dépouillement des essais rhéologiques

Tous les résultats des essais sont donnés dans les tableaux V à VII.

Essai au cône d'Abrams

On a obtenu des affaissements variant dans la totalité de la gamme, depuis des valeurs nulles jusqu'à 29 cm (pour un mortier autonivelant).

Pour les mélanges les plus fluides, on a également mesuré l'étalement (diamètre moyen de la flaque après stabilisation, mesuré parallèlement aux côtés de la plaque métallique rectangulaire sur laquelle les essais étaient pratiqués). Certains bétons ont présenté une ségrégation, se manifestant par la formation d'un amoncellement de gravillons entourés par un lac de mortier. À l'intérieur de chaque groupe correspondant au même mélange sec, l'affaissement a augmenté avec le dosage en eau, sauf pour les groupes BHP1 et BHP4, qui comportent chacun une valeur suspecte. On note, par ailleurs, que la sensibilité à l'eau de l'affaissement au cône s'est avérée très différente d'une série à l'autre.

Essais au rhéomètre

L'essai au rhéomètre a été systématiquement pratiqué sur tous les mélanges fabriqués. Cependant, certains mélanges, du fait d'affaissements trop faibles, ou de granulométries trop éloignées de l'optimum, n'ont pas permis d'obtenir des mesures exploitables. Certains bétons (comme ceux de la série BHP8, qui étaient adjuvantés et surdosés en ciment) ont présenté la particularité d'être autonivelants, mais avec une viscosité considérable, se traduisant visuellement par une extrême lenteur à atteindre leur position d'équilibre lors de l'essai au cône d'Abrams. Le couple nécessaire pour les cisailer à la vitesse maximale (0,8 t/s) a parfois dépassé les capacités du moteur du rhéomètre. C'est pourquoi, après un essai infructueux, on a répété l'opération en limitant la gamme de gradient de vitesse (pour les essais à gradient réduit, tableau VI).

L'intensité du ressuage a beaucoup varié selon les mélanges. Dans la série des bétons non adjuvantés, seuls les bétons sous-dosés en ciment (groupes BO2 et BO3) ont présenté un ressuage appréciable (pendant la durée de l'essai au rhéomètre). Par contre, une majorité de bétons adjuvantés a manifesté ce phénomène, spécialement lorsqu'on faisait croître l'affaissement par ajout d'eau. Les bétons dits intermédiaires n'ont pas échappé à la règle, alors que les bétons aux fumées de silice sont restés apparemment homogènes pendant les essais, confirmant le caractère stabilisant bien connu des ultrafines.

L'effet négatif de l'adjuvant sur l'homogénéité des bétons s'est également vérifié selon le critère de ségrégation par remontée du gravillon. Cette conséquence de la dilatance des mélanges [Hu, 1995] s'est, comme on pouvait s'y attendre, manifestée particulièrement pour les mélanges à la fois adjuvantés et surdosés en gravillons.

TABLEAU V
Résultat des essais pour les bétons non adjuvés.
Les bétons dont le nom n'est pas en caractère gras sont en principe
en dehors du champ d'application du rhéomètre, étant donnée la valeur de leur affaissement au cône

Mélanges	Cône d'Abrams			Bingham		Herschel-Bulkley			Observations		Commentaires	
	Densité	Affaissement (cm)	Temps (s)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil (Pa)	a (Pa.s ^b)	b	μ' (Pa.s)	Res-suage		Ségrégation grav.
BO1C	2,33	8		1 717	174	1 804	111	1,23	156			
BO1B'	2,33	10		1 489	163	1 599	86	1,33	140			
BO1A	2,31	13	2,15	1 219	160	1 341	74	1,40	134			
BO1A'	2,32	16,5	1,51	881	133	983	62	1,40	111	1		
BO1B	2,30	22,5	0,85	802	84	778	102	0,90	89	1		
BO2A	2,28	5,5		1 387	285	1 612	132	1,39	236			
BO2B	2,27	12,5	1,55	1 037	163	1 162	74	1,41	137	2		
BO2C	2,26	17	1,73	1 185	130	1 306	46	1,55	105	3		<i>cône cisailé</i>
BO3A	2,24	3,5		1 385	258	1 690	60	1,77	191	1		
BO3B	2,21	6		1 206	200	1 460	36	1,92	145	2		
BO3C	2,19	18,5	1,16	799	127	949	27	1,84	96	3		
BO4A	2,29	8		1 906	147	2 019	70	1,38	122		1	<i>cône cisailé + problème de cohésion</i>
BO4C	2,31	13,5	2,42	1 676	209	1 972	28	2,09	144		1	<i>manque de cohésion</i>
BO4B	2,29	18,5	2	1 913	223	2 151	57	1,75	176		1	<i>manque de cohésion</i>
BO5A	2,26	9,5		1 008	208	1 234	55	1,72	161			
BO5B	2,26	9,5	1,9	951	172	1 071	87	1,35	146			
BO5C	2,22	16	1,43	839	90	906	43	1,39	76	1		
BO6C	2,11	5,5		2 216	73	2 344	1	3,39	50			
BO6B	2,12	7		2 036	77	2 163	3	2,84	50			
BO6A	2,10	6,5		2 132	96	2 273	11	2,20	67			
BO7C	2,33	12	2,24	1 473	183	1 665	53	1,66	143		1	
BO7A	2,31	15,5	1,91	1 147	147	1 281	54	1,53	119			
BO7B	2,30	19,5	1,4	752	117	869	38	1,61	93			
BO8C	2,33	10,5	1,99	1 688	146	1 841	42	1,66	114			
BO8A	2,33	17	1,57	1 090	111	1 115	93	1,09	106			
BO8B	2,31	20,5	1,06	888	59	901	50	1,09	56			
BO9A	2,27	10,5	2,57	1 432	75	1 496	30	1,48	62			
BO9B	2,27	15	1,15	1 068	73	1 137	26	1,55	59			
BO9C	2,26	22,5	0,67	733	34	771	9	1,74	27			
BO10C	2,17	8		1 702	52	1 754	17	1,61	42			
BO10B	2,12	17	0,96	1 123	35	1 049	96	0,57	52			
BO10A	2,15	21	0,92	1 024	46	1 061	20	1,45	38			
BO11A	2,17	11,5	1,22	1 195	48	1 263	5	2,22	34			
BO11B	2,19	17,5	0,92	976	36	1 001	18	1,36	31			
BO11C	2,20	23	0,91	731	25	764	4	1,97	19			

TABLEAU VI

Résultat des essais pour les bétons adjuvantés.

Seuls les bétons dont le nom est en caractères gras ont fait l'objet d'essais au rhéomètre exploitables

Mélanges	Cône d'Abrams				Bingham		Herschel-Bulkley				Observations		Commentaires
	Densité	Affaissement (cm)	Temps (s)	Étalement (cm)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil (Pa)	a (Pa.s ^b)	b	μ' (Pa.s)	Res-suage	Ségrégation	
BHP1A	2,38	21,5	15,97		649	499	759	417	1,09	476	1		<i>cône cisailé</i>
BHP1A'	2,38	18	10,19		593	517	774	385	1,15	479	1		
BHP1B	2,38	20,5	7,03		473	530	608	430	1,10	501	2		
BHP1B'	2,38		5,34		122	427	537	147	1,56	338	2		
BHP1C	2,37	23,5			141	439	471	205	1,40	370	3		
BHP2A	2,27	0,5										2	
BHP2B	2,30	0,5										2	
BHP2C	2,33	1									1	2	
BHP3A	2,20	0											<i>terre humide</i> <i>terre humide</i>
BHP3C	2,19	0											
BHP3C'	2,20	1									3		
BHP4C	2,41	13,5	11,93								1	3	<i>manque de cohésion</i>
BHP4A	2,37	15	7,22		1 216	544	1 741	190	1,54	425	1	2	
BHP4B	2,40	12	12,32		893	437	1 457	87	1,83	301	3	2	
BHP5A	2,25	15	12,97		1 055	519	863	665	0,88	561			
BHP5B	2,32	22,5	4,95		363	589	476	506	1,07	565	1		
BHP5C	2,32	26	2,04	59	115	401	413	191	1,39	338	2		
BHP6A	2,00	4,5									1		
BHP6C	2,22	14,5	2,17		200	303	500	99	1,59	240	2		
BHP6B	2,21	20			465	424	877	145	1,56	336	3		
BHP7C	2,43	24	2,97	55								3	<i>tas de cailloux*</i> <i>tas de cailloux*</i> <i>tas de cailloux*</i>
BHP7B	2,44	24,5	2,08	64	90	586	467	316	1,32	508	1	3	
BHP7A	2,40	25	1,82	67	61	535	585	181	1,57	422	2	2	
BHP8C	2,40	26,5	4,27	56	- 452	1 960	675	792	1,88	2 956			<i>gradient réduit</i>
BHP8B	2,39	28,5	1,83	70	- 373	879	457	269	1,73	795	1	1	
BHP8A	2,37	29		75	- 147	488	385	132	1,70	376	2	1	
BHP9C	2,37	27,5	2,56	63	- 73	802	548	336	1,52	726	0,5		
BHP9A	2,29	27	1,8	62	47	528	268	367	1,18	480	1		
BHP9B	2,35	28,5	1,24	76	- 85	322	256	92	1,67	252	2		
BHP10C	2,34	28	1,56	74	145	694	314	560	1,12	669			<i>gradient réduit</i>
BHP10B	2,31	28,5	1,37	79	204	371	327	281	1,14	345	2		
BHP10A	2,13	29	1,06	76	250	155	323	101	1,21	139	1		
BHP11C	2,37	29	1,22	85	86	695	193	615	1,06	672			
BHP11B	2,34	29	1,37	89	- 123	429	279	153	1,55	346			
BHP11A	2,35	29,5	1,32	95	- 14	297	96	217	1,16	274	2		

* au milieu du test d'étalement

TABLEAU VII

Résultat des essais pour les bétons adjuvantés (bétons intermédiaires et aux fumées de silice)

Mélanges	Cône d'Abrams				Bingham		Herschel-Bulkley				Observations		Commentaires
	Densité	Affaissement (cm)	Temps (s)	Étalement (cm)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Seuil (Pa)	a (Pa.s ^b)	b	μ' (Pa.s)	Res-suage	Ségrégation	
80 % BO	2,25	24	0,63		432	121	451	106	1,07	116	2		<i>tas de cailloux</i> <i>tas de cailloux</i>
60 % BO	2,33	23,5	1,02	66	294	205	353	161	1,12	192	3		
40 % BO	2,36	22	1,97	60	77	295	312	132	1,42	245	3		
20 % BO	2,39	22	2,93		33	394	448	115	1,66	308	3		
FS 7,5	2,40	24,5	2,46		303	449	594	243	1,32	387			
FS 15	2,43	23,5	2,66		312	423	527	267	1,23	378			
FS 22,5	2,42	23	3,31		625	418	748	327	1,13	393			
FS 30	2,45	21,5			1 117	397	1 068	435	0,96	408			

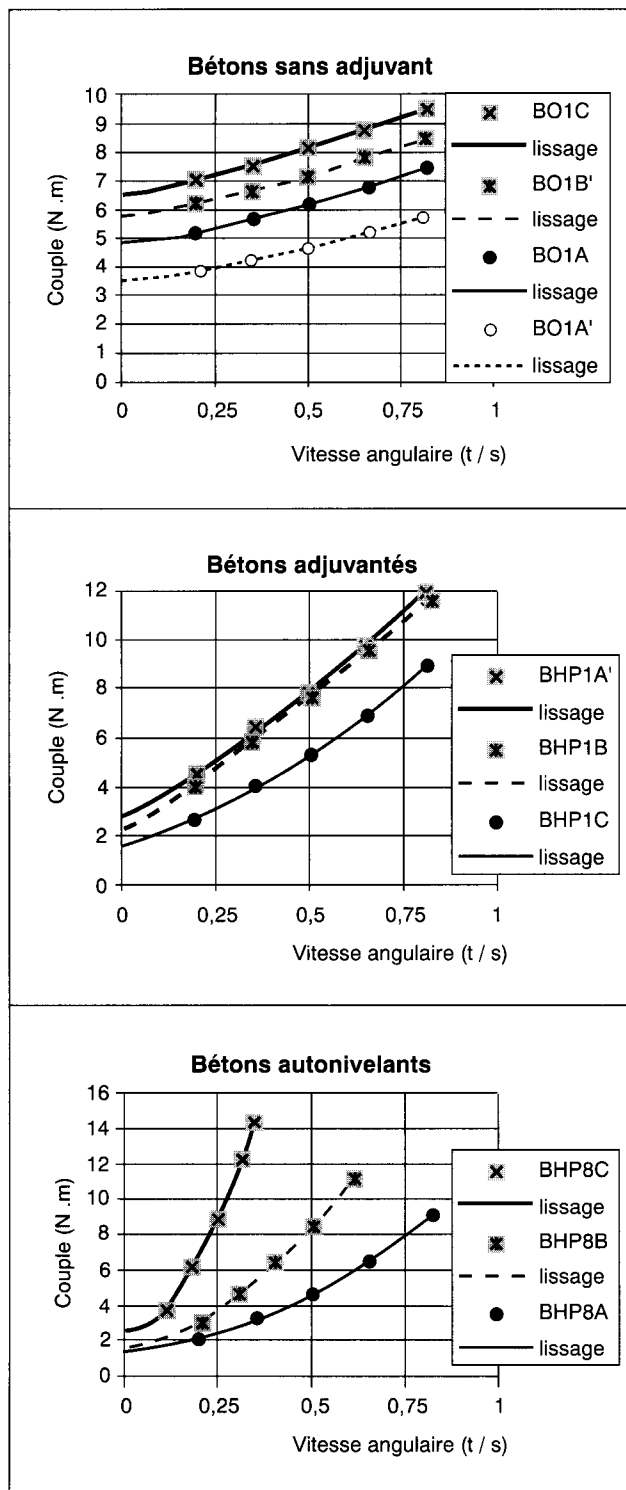


Fig. 6 - Mesures de couple en fonction de la vitesse angulaire pour trois groupes de bétons, et lissage par un modèle de type Herschel-Bulkley. Dans chaque groupe, les courbes se classent correctement en fonction de la teneur en eau des mélanges (c'est-à-dire que le couple diminue lorsque le dosage en eau augmente).

Dépouillement des résultats selon le modèle de Bingham

Pour chaque essai au rhéomètre, on a procédé à une régression linéaire sur les valeurs de couple net (c'est-à-dire après soustraction de la contribution du joint) en fonction de la vitesse de rotation, afin de déduire les paramètres de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité plastique), selon la procédure donnée dans [Hu, 1995].

Les valeurs de viscosité plastique se distribuent dans une très large gamme. D'une façon générale, les mélanges adjuvés ont de fortes viscosités, supérieures aux mélanges sans adjuvant. Cela provient du fait que les superplastifiants agissent beaucoup plus sur le seuil de cisaillement que sur la viscosité, alors que la réduction d'eau provoque un accroissement notable des deux paramètres [Tattersall, 1991 ; Hu, 1995]. Dans la série des bétons intermédiaires, alors que les affaissements restent dans la même plage, il est frappant de constater comment la viscosité augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du mélange central adjuvé (tableau VII). *A contrario*, l'incorporation de fumée de silice permet de combattre l'effet de la baisse du dosage en eau sur la viscosité, selon un effet classique de remplissage : en comparant le mélange central adjuvé (BHP1C) au mélange le plus riche en fumée de silice (FS 30), la viscosité plastique diminue de 530 à 400 Pa.s, alors que le rapport eau/liant décroît de 0,38 à 0,24. On confirme ici l'effet bénéfique des fumées de silice sur la viscosité des bétons à hautes performances [Yonezawa et al., 1992].

Si l'on se restreint aux bétons dont les affaissements sont au moins égaux à 10 cm, les seuils obtenus restent inférieurs à 2 000 Pa, ce à quoi on s'attendait sur la base de l'expérience passée [Hu, 1995]. Par contre, on obtient des seuils négatifs pour sept mélanges, avec parfois des valeurs inférieures à - 300 Pa en valeur algébrique, qui ne sont pas explicables par l'incertitude liée à la mesure (de l'ordre d'une centaine de Pa). De plus, l'examen des courbes brutes donnant le couple résistant du béton en fonction de la vitesse angulaire des pales du rhéomètre fait apparaître une non-linéarité quasi-systématique (fig. 6).

Le béton frais, matériau de Herschel-Bulkley

Il semble donc qu'il faille se résoudre à exploiter les essais avec un modèle d'un degré de complexité supérieur, par rapport à la technique de régression linéaire adoptée jusque là. S'inspirant d'une approche empruntée pour décrire la rhéologie des laves torrentielles [Coussot et Piau, 1995] - matériaux granulaires qui présentent de nombreuses similitudes avec le béton - on a tenté d'utiliser le modèle de Herschel-Bulkley.

Celui-ci prévoit une relation contrainte/gradient de vitesse selon une loi de puissance [Bird et al., 1982] :

$$\tau = \tau'_0 + a \dot{\gamma}^b$$

où τ est la contrainte de cisaillement, $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse, τ'_0 le seuil de cisaillement, a et b deux paramètres caractéristiques du matériau. La relation couple/vitesse angulaire du rhéomètre, analogue de l'équation précédente, se calcule aisément par intégration de la loi de comportement, pour un champ de vitesse correspondant au mouvement de torsion imposé par la géométrie de l'essai. Elle est de la forme :

$$\Gamma = \Gamma_0 + A N^b$$

où Γ est le couple résistant, N la vitesse angulaire en tours par seconde, A et b deux paramètres dépendant du béton et des dimensions de l'appareil. En parcourant les mêmes étapes de calcul que dans le dépouillement de l'essai selon le modèle de Bingham [Hu, 1995], on trouve les relations suivantes pour les paramètres relatifs au béton :

$$\tau'_0 = \frac{3}{2\pi (R_2^3 - R_1^3)} \Gamma_0$$

$$a = 0,9 \frac{(b+3)}{(2\pi)^{b+1}} \frac{h^b}{(R_2^{b+3} - R_1^{b+3})} A$$

expressions dans lesquelles R_1 et R_2 sont les rayons intérieur et extérieur de l'échantillon de béton dans le rhéomètre (valant respectivement 20 et 120 mm), et h la hauteur du même échantillon (égale à 100 mm). Le coefficient 0,9 dans l'équation donnant le coefficient a tient compte de l'effet perturbateur de frottement des parois latérales sur l'écoulement du béton dans l'appareil.

On a appliqué ce traitement à la totalité des courbes expérimentales donnant la variation du couple résistant en fonction de la vitesse angulaire. Il en ressort que le modèle d'Herschel-Bulkley permet de lisser les courbes expérimentales avec une excellente approximation. Des exemples de lissage sont donnés sur la figure 6, et les valeurs des paramètres rhéologiques relatifs aux différents mélanges apparaissent dans les tableaux V à VII. On constate que la totalité des valeurs de seuil de cisaillement, selon ce nouveau modèle, sont positives. Quant aux valeurs du paramètre b , elles sont généralement supérieures à 1 (1,53 en moyenne pour les bétons sans adjuvant, et 1,36 pour les bétons avec adjuvants), ce qui montre bien que le comportement réel du béton frais s'éloigne significativement du comportement linéaire prévu par le modèle de Bingham.

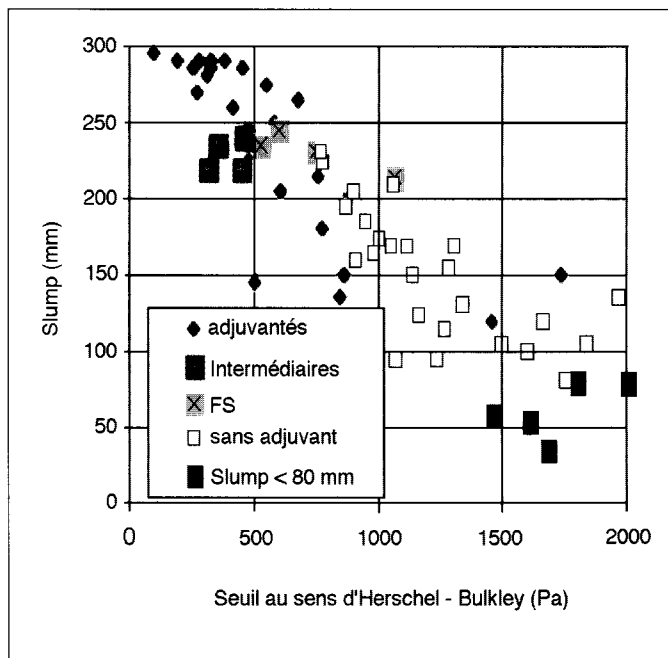


Fig. 7 - Relation entre seuil de cisaillement (au sens d'Herschel-Bulkley) et affaissement au cône d'Abrams, pour l'ensemble des bétons testés.

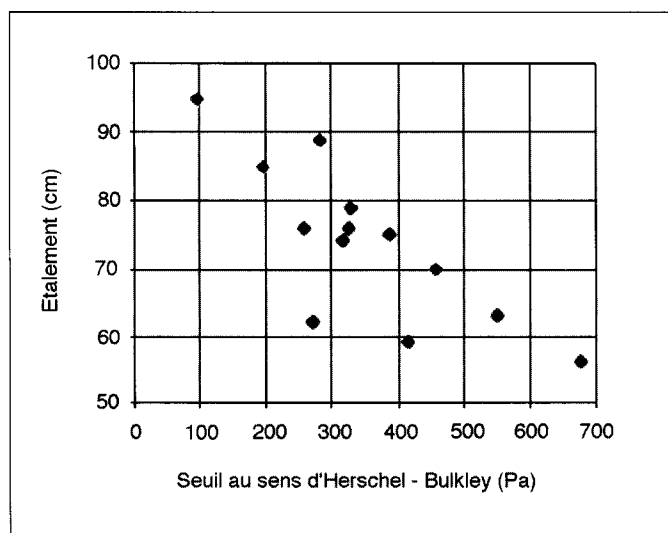


Fig. 8 - Relation entre seuil de cisaillement (au sens d'Herschel-Bulkley) et étalement du cône d'Abrams, pour les bétons autonive-lants.

Relation entre mesures au cône d'Abrams et seuil au sens de Herschel-Bulkley

Le lien entre le seuil de cisaillement et l'affaissement au cône d'Abrams a été montré, tant théoriquement qu'expérimentalement [Hu, 1995]. Les présents essais confirment cette tendance (fig. 7). Si l'on ajoute les essais pratiqués sur les mélanges sans adjuvant, pour lesquels l'affaissement était inférieur à 10 cm, on constate que les points expérimentaux prolongent le nuage formé

par les autres résultats. Ceci tendrait à prouver que la plage de validité des essais au rhéomètre, si l'on se restreint à la valeur de seuil obtenue, s'étendrait en deçà de la consistance très plastique. On s'est intéressé également à l'étalement final, réputé fournir une meilleure appréciation de la consistance pour les bétons autonivelants [Sedran, 1995]. En excluant les mélanges dont l'essai au cône a présenté une ségrégation par amoncellement de gravillons au milieu de la flaque, on trouve que l'étalement est, lui aussi, assez directement lié au seuil de cisaillement (fig. 8). Ainsi, les mesures acquises à l'aide du cône d'Abrams tendent à valider l'utilisation du modèle d'Herschel-Bulkley pour l'analyse des essais rhéologiques.

Discussion

La non-linéarité de comportement trouvée proviendrait-elle d'un artefact ?

Afin de minimiser les sollicitations exercées sur l'échantillon de béton, susceptibles d'engendrer des phénomènes de ségrégation, on avait adopté, comme dit plus haut, un mode opératoire consistant à mesurer cinq valeurs de couple, pour cinq niveaux de vitesse angulaire. L'inconvénient de ce choix est apparu *a posteriori*, lorsqu'on s'est rendu compte qu'il faudrait déterminer par régression trois paramètres sur ces cinq points expérimentaux. La procédure ne présente pas de difficulté d'ordre mathématique. Par contre, étant donné le faible degré de liberté du système, le fait d'obtenir un bon lissage n'est pas une garantie absolue de la pertinence du modèle. Afin de juger de la précision obtenue sur les paramètres de lissage, on a gardé un des échantillons de béton testé selon le mode opératoire préalablement défini (essai B08C), et on a répété l'essai selon un mode opératoire identique, à ceci près que la plage de vitesse angulaire a été étendue dans les deux directions (c'est-à-dire on a ajouté un point à vitesse plus rapide, et un autre à vitesse plus lente, l'ensemble des points étant toujours parcouru à vitesse décroissante). Le résultat de cet essai supplémentaire (B08Cbis) est donné sur la figure 9.

On constate tout d'abord une différence sensible entre les valeurs de couples obtenues dans les deux essais, qui se traduit notamment par des différences notables en valeur de seuil (tableaux V et VIII). C'est probablement un effet de la ségrégation produite par l'essai au rhéomètre sur ce type de mélange [de Larrard et al., 1996b], qui justifie les précautions prises dans le mode opératoire adopté. Par contre, lorsqu'on considère isolément les résultats du deuxième essai, il en ressort que les paramètres de Herschel-

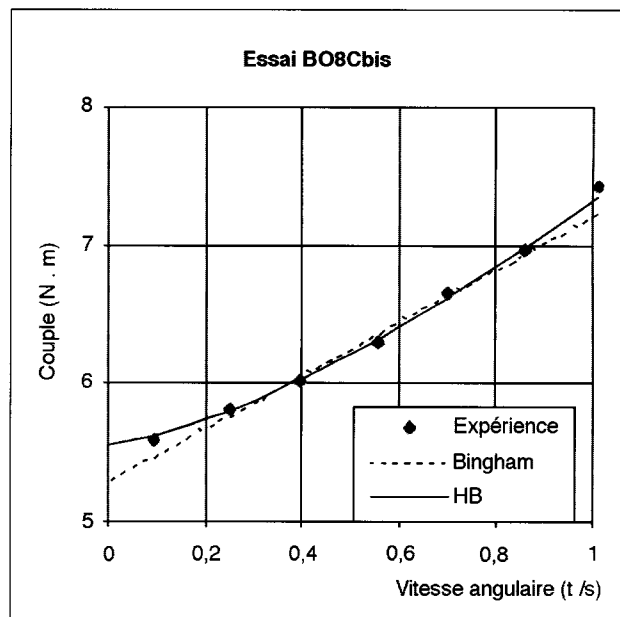


Fig. 9 - Mesures de couple en fonction de la vitesse angulaire, pour l'essai B08Cbis.

TABLEAU VIII
Exploitation de l'essai B08Cbis, dans la plage de gradient normale (cinq points expérimentaux), et dans la plage de gradient étendue (sept points expérimentaux)

	Gradients (l/s)	τ_0 (Pa)	a (Pa.s ^b)	b
5 pts	0,31/6,5	1 539	36,1	1,43
7 pts	0,12/7,6	1 535	34,7	1,47

Bulkley sont peu sensibles à la population de points considérée, qu'elle consiste en la totalité des sept points, ou qu'elle soit réduite aux cinq points centraux, comme dans l'essai standard. On peut donc penser que si l'on avait pratiqué tous les essais dans la même gamme de gradient de vitesse, mais avec un nombre de points de mesure supérieur, les paramètres rhéologiques obtenus n'auraient pas été très différents de ceux trouvés dans la présente campagne.

Une autre question qui vient naturellement à l'esprit est de savoir dans quelle mesure l'effet de la force centrifuge pourrait expliquer le comportement non linéaire. En effet, la contribution au couple résistant des couches extérieures de l'échantillon (dont la distance à l'axe est supérieure à la moitié du rayon de l'appareil) est prédominante, et pourrait être le siège d'une surconcentration en granulat. Cette hypothèse nous paraît pouvoir être écartée pour les raisons suivantes :

➤ l'accélération due à la force centrifuge est au maximum égale à 3 m/s² (pour une vitesse angu-

laire de 0,8 t/s et un rayon de 0,12 m), soit moins d'un tiers de l'accélération de la pesanteur. L'éventuelle ségrégation due au mouvement circulaire doit donc rester mineure devant celle, inévitable, qui proviendrait de la gravité ;

➤ si l'on prend l'exemple du mélange BHP8C, ce béton présente un comportement fortement non linéaire ($b = 1,88$). La vitesse de rotation maximale pendant l'essai au rhéomètre n'a pourtant été que de 0,34 t/s (correspondant à une accélération maximale de $0,5 \text{ m/s}^2$). De plus, étant donnée la viscosité extrême de ce matériau, on voit mal comment le gravillon aurait pu se séparer du reste du mélange ;

➤ enfin, si l'on compare le comportement des mortiers (groupes BO6-BO10-BO11 et BHP6-BHP10-BHP11) avec celui des bétons, la valeur moyenne du coefficient b d'Herschel-Bulkley trouvée pour les premiers est de 1,45. Elle est du même ordre de grandeur que celle des bétons, alors que les mortiers sont en général beaucoup moins sensibles à la ségrégation, du fait de la taille limitée du gros granulat, et de l'importance accrue des forces de surfaces par rapport aux forces volumiques dans les mouvements relatifs des particules.

Ainsi, on peut penser que le comportement rhéologique des mélanges étudiés est bien non linéaire.

Faut-il jeter le modèle de Bingham dans les poubelles de l'histoire* ?

Un premier résultat de la présente recherche, inattendu, est constitué par la nécessité de fournir au moins trois paramètres pour décrire le comportement du béton frais remanié : facteur de complication significatif, si l'on se rappelle des manques à combler pour faire de la rhéologie un outil d'ingénieur (fig. 1). Une partie importante de la communauté technique est déjà réticente à adopter l'approche de Bingham, elle-même plus complexe que l'approche classique, selon laquelle un seul paramètre appelé maniabilité caractérise le béton frais. Dans quelle mesure la sophistication supplémentaire inhérente au modèle de Herschel-Bulkley est-elle nécessaire ?

Si l'on désire caractériser le comportement du béton dans une plage de gradient comprise entre 0 et 6 s^{-1} **, on peut penser que le modèle de Bingham reste suffisant, quitte à changer le mode de calcul des paramètres seuil et viscosité.

* du moins pour ce qui concerne son utilisation dans le domaine du béton...

** qui inclut la plage de l'essai au rhéomètre BTRHEOM.

En effet, il suffit pour cela de procéder à une approximation linéaire de la courbe de Herschel-Bulkley dans le domaine en question. Le seuil de cisaillement à adopter est celui calculé par le modèle à trois paramètres. Pour ce qui est de la viscosité plastique, on établit facilement l'égalité suivante en minimisant l'écart entre les deux modèles par la méthode des moindres carrés :

$$\mu' = \frac{3a}{b+2} \dot{\gamma}_{\max}^{b-1}$$

où μ' est la pente de cette droite (fig. 10), et $\dot{\gamma}_{\max}$ le gradient de vitesse maximal atteint dans l'essai (6 s^{-1} dans le présent mode opératoire). Le modèle de Bingham avec τ'_0 et μ' comme valeurs du seuil et de la viscosité plastique permet alors de garder une approche relativement simple du comportement, sans avoir l'inconvénient des seuils négatifs inhérent à l'approche originelle de Tattersall. Les valeurs de μ' ont été calculées pour les bétons testés (tableaux V à VII). Les paramètres μ et μ' sont du même ordre de grandeur, le second étant un peu plus faible à chaque fois que l'exposant b est supérieur à 1 (ce qui se vérifie dans la majorité des cas).

Par contre, lorsqu'on désire extrapoler un modèle rhéologique dans une gamme supérieure de gradients, par rapport à l'essai pratiqué – comme par exemple pour la simulation du pompage du béton – il est certainement préférable d'utiliser le modèle à trois paramètres d'Herschel-Bulkley. Le programme d'essais en cours dans le cadre du projet national CALIBE permettra de confirmer ou d'infirmer cette assertion.

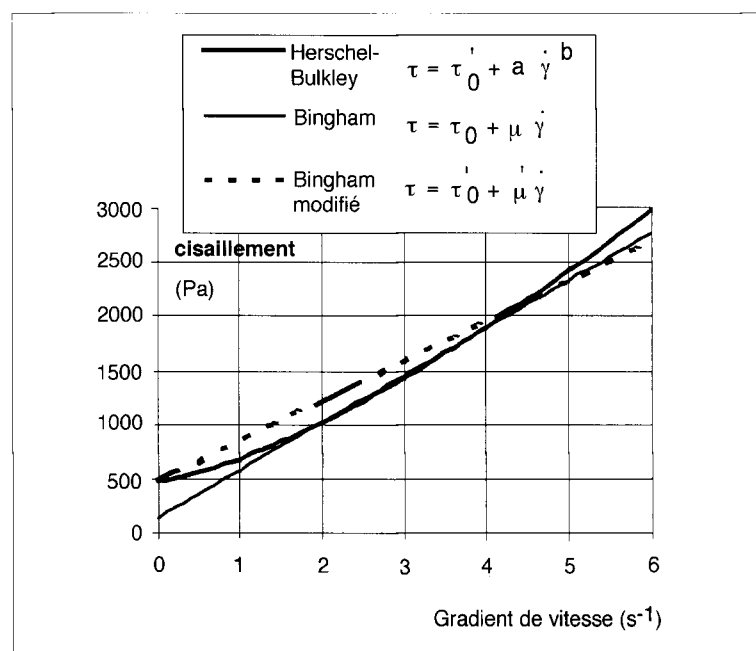


Fig. 10 - Calcul des paramètres de Bingham, à partir du modèle d'Herschel-Bulkley. On impose à la droite de Bingham modifiée de partir du point d'abscisse 0 et d'ordonnée τ'_0 comme la courbe de comportement.

Conclusion

On a présenté dans ce premier article les résultats d'un plan expérimental ambitieux, dont le but était de générer un ensemble de données suffisamment riche pour permettre au modélisateur de relier la composition des bétons avec leurs propriétés rhéologiques. Pour près de 80 mélanges, dont les formulations balaient systématiquement l'espace des proportions mutuelles en visant le domaine des consistances caractérisables par le rhéomètre, on a effectué en parallèle des essais d'affaissement au cône d'Abrams et des essais au rhéomètre sans vibration.

Ces résultats ont conduit à modifier l'exploitation de l'essai rhéologique qui avait été mise en œuvre auparavant. Il apparaît que le modèle à trois paramètres d'Herschel-Bulkley est mieux

apte à décrire la loi de comportement du béton frais que le modèle à deux paramètres de Bingham. L'argument essentiel est fourni par les bétons autonivelants, pour lesquels une exploitation selon Bingham conduit souvent à des seuils de cisaillement négatifs. Au contraire, le modèle d'Herschel-Bulkley donne des seuils toujours positifs, raisonnablement corrélés avec les indications du cône d'Abrams (affaissement et/ou étalement, selon les mélanges considérés).

On montre cependant que, pour un certain nombre d'applications, le modèle de Bingham demeure un outil efficace, à condition de changer le mode de calcul des paramètres seuil de cisaillement et viscosité plastique. Des équations simples ont été proposées pour procéder à ce nouveau dépouillement de l'essai.

Remerciements

Les auteurs remercient John Winpinger et Frank Davis, du National Institute of Standards and Technology, pour leur participation à la préparation des matériaux et aux essais rhéologiques. Ils n'oublient pas non plus l'aide apportée par Thierry Sedran (LCPC) pour le dépouillement des essais au rhéomètre, Pierre Roussel (LCPC) pour les essais d'identification des liants, et par le service Physico-Chimie des Matériaux du LCPC pour les analyses des constituants. Enfin, ils mentionnent les contributions de la société Grace (qui a fourni le malaxeur et l'adjuvant) et de la société Elkem (fournisseur de la fumée de silice).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIRD R.B., DAI G.C., YARUSSO B.J. (1982), The rheology and flow of viscoplastic materials, *Rev. Chem. Eng.*, **1**, pp. 1-70.

COUSSOT P., PIAU J.-M. (1995), A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions, *Journal of Rheology*, **39**, pp. 104-123.

DE LARRARD F., SITZKAR J.C., HU C. (1993), Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **186**, pp. 55-60.

DE LARRARD F., HU C., SITZKAR J.C., JOLY M., CLAUX F., SEDRAN T. (1994), Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides, *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, **527**, pp. 17-47.

DE LARRARD F., BOSCH F., CATHERINE C., DEFLORENNE F. (1996a), Nouvelle méthode des coulis AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **202**, pp. 61-70.

DE LARRARD F., SEDRAN T., HU C., SITZKAR J.C., JOLY M., DERKX F. (1996b), *Evolution of the workability of superplasticized concretes : assessment with BTRHEOM rheometer*, Proceedings of the International RILEM conference on production methods and workability of concrete, Paisley, edited by P.J.M. Bartos, D.L. Marris and D.J. Cleland, pp. 377-388.

HU C., DE LARRARD F., GJØRV O.E. (1995), Rheological testing and modelling of fresh high-performance concrete, *Materials and Structures*, **Vol. 28**, pp. 1-7.

HU C. (1995), *Rhéologie des bétons fluides*, Études et recherches des LPC, **OA 16**, 203 pages.

HUYNH T. (1996), La compatibilité ciment-adjuvant. Étude bibliographique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **206**, pp. 63-74.

SEDRAN T., DE LARRARD F. (1994), RENÉ-LCPC - Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, Note technique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, pp. 87-93.

SEDRAN T. (1995), Les bétons autonivelants. Synthèse bibliographique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **196**, pp. 53-60.

TANG F. J., BHATTACHARJA S. (1996), *Development of an Early Stiffening Test*, PCA Research and Development, RP 346.

TANIGAWA Y., MORI H. (1989), Analytical study on deformation of fresh concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 115, **3**.

TANIGAWA Y., MORI H., WATANABE K. (1991), *Analytical and experimental studies on casting of fresh concrete into wall form*, Transcription of the Japan Concrete Society, **Vol. 13**.

TATERSALL G.H. (1991), *Workability and Quality-Control of Concrete*, E & FN SPON, London.

WALLEVIK O. (1990), *Den ferske betongens reologi og anvendelse pa betong med og uten tilsetning av silikastov*, PhD Thesis, University of Trondheim NTH.

YONEZAWA T., IZUMI I., OKUNO T., SUGIMOTO M., SHIMONO T., ASAKURA E. (1992), *Reducing the viscosity of high-strength concrete using silica fume*, 4th CANMET/ACI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary papers, Istanbul.

ABSTRACT

The rheology of disturbed fresh concrete 1 - Experimental plan and analysis of the results

F. de LARRARD - C. FERRARIS

The results of an experimental programme dealing with the rheology of fresh concrete are presented. More than 80 mixes (mortars and concretes, with or without superplasticizers) were designed and tested. The rheological characteristics of the mixes were measured with the BTR-100 rheometer and Abrams cone tests were simultaneously performed. It emerged that the relationship between the torque and speed of rotation of the rheometer is not strictly linear. The Herschel-Bulkley model provides a more precise description of the behaviour of the material, with the form $\tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b$ where τ is the shear stress, $\dot{\gamma}$ is the speed gradient applied to the sample, τ_0 , a and b are parameters which are characteristic of the tested concrete. Amongst the benefits of this new approach is that it avoids the problem of negative thresholds which arises with the Bingham model. For a number of applications it is nevertheless possible to retain the Bingham approach, on condition that the rheometer test is conducted differently.