



Documents scientifiques et techniques

RECOMMANDATIONS POUR L'EMPLOI DES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS

AFGC / PN B@P

Janvier 2008



PRÉAMBULE

Le présent document a été élaboré à partir du document AFGC « Bétons Auto-Plaçants - Recommandations provisoires » (juillet 2000) et des enseignements tirés du Projet National B@P, placé sous la présidence d'Yves Malier (Ecole française du Béton) et la direction technique de Michel Guérinet (Eiffage). Ce projet a permis de répondre aux interrogations laissées en suspens et de faire définitivement passer les bétons auto-plaçants (BAP) du statut de matériau de laboratoire à celui de béton utilisable pour réaliser des ouvrages de qualité, en bâtiment comme en génie civil.

Si la majorité des applications actuelles relèvent du domaine du bâtiment (voir la monographie établie par le PN [B@P](#) et éditée par Cimbéton), le texte révisé du Fascicule 65A s'est inspiré du projet des présentes recommandations et considère dorénavant les BAP sur le même plan que les bétons à hautes performances (BHP). La principale nouveauté concerne l'introduction de catégories de BAP (en fonction des applications) qui devraient permettre d'améliorer la compétitivité des BAP sur le marché du béton prêt à l'emploi (BPE).

Cette approche française a été également introduite dans le projet d'extension de la norme EN 206 (EN 206-9) et, bien que ce projet européen ne soit pas encore publié, son contenu paraît suffisamment figé pour que les présentes recommandations puissent être éditées sans risquer de discordance majeure.

F. CUSSIGH

Animateur du groupe de travail

Groupe de rédaction

Mmes	Béatrice BOURDETTE	(ATILH)
	Sylvie LECRUX	(CALCIA)
MM.	Horacio COLINA	(ATILH)
	Sylvain DEHAUDT	(CERIB)
	Yann JAFFRE	(SETRA)
	Bruno HUVELIN	(CEMEX)
	Robert LE ROY	(LCPC)
	Lionel LINGER	(VINCI Construction GP)
	Hubert MAHOUCHE	(HOLCIM)
	Patrick ROUGEAU	(CERIB)
	Roland SCHELL	(Béton de France)
	Arnaud SCHWARTZENTRUBER	(SIKA)
	François CUSSIGH	(VINCI Construction France)

SOMMAIRE VERSION FRANÇAISE

1.	INTRODUCTION	7
2.	DÉFINITIONS	7
3.	CONTEXTE NORMATIF	8
4.	SPÉCIFICATIONS DES BAP A L'ÉTAT FRAIS	8
4.1.	Classification des BAP	8
4.2.	Ouvrabilité des BAP	9
4.3.	Spécifications des BAP	10
5.	PRINCIPES DE FORMULATION	11
5.1.	Cahier des charges minimum à l'état frais	11
5.2.	Particularité de la composition des BAP	12
6.	QUALIFICATION DE LA FORMULE	14
7.	FABRICATION DU BÉTON	15
7.1.	Généralités	15
7.2.	Equipement des centrales	15
7.3.	Procédures de fabrication	16
7.4.	Adjuventation sur site	17
7.5.	Transport	17
8.	RÉCEPTION DU BÉTON SUR CHANTIER	18
9.	MISE EN ŒUVRE DU BÉTON	18
9.1.	Les différents modes de mise en œuvre des BAP	18
9.2.	Les coffrages	20
9.2.1.	Préparation	20
9.2.2.	Résistance des coffrages à la poussée des BAP	21
9.3.	Recommandations sur la hauteur de chute et la longueur de cheminement des BAP	22
9.4.	La finition et la cure des BAP	22
10.	PROPRIÉTÉS DU BÉTON DURCI	23
10.1.	Déformations instantanées et différées	23
10.2.	Durabilité	23
10.3.	Autres propriétés	24
	BIBLIOGRAPHIE	25

ANNEXE A	DÉTERMINATION DE L'INTERVALLE D'ÉCOULEMENT	27
ANNEXE B	ESSAIS D'ÉTALEMENT AU CÔNE D'ABRAMS	28
ANNEXE C	ESSAIS À LA BOITE EN L	31
ANNEXE D	ESSAI DE STABILITÉ AU TAMIS	34
ANNEXE E	VÉRIFICATION DE L'HOMOGENÉITÉ EN PLACE DU BAP	36
ANNEXE F	DÉFORMATIONS INSTANTANÉES ET DIFFÉRÉES DES BAP	38
ANNEXE G	DURABILITÉ DES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS	51
ANNEXE H	AIDE A LA RÉDACTION DE CAHIER DES CHARGES TECHNIQUES POUR LES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS (BAP)	53
ANNEXE H1	Définition de la fourchette d'étalement à la réception d'un BAP	60
ANNEXE H2	Caractéristiques du BAP à l'état frais	61
ANNEXE H3	Epreuve d'étude en laboratoire	63

VERSION ANGLAISE / ENGLISH VERSION	65
---	-----------

TABLE OF CONTENTS	69
--------------------------	-----------

1. INTRODUCTION

Les présentes recommandations ont pour but, en l'absence de référentiel normatif à ce jour sur le sujet, de déterminer un cadre d'emploi des BAP permettant une utilisation suffisamment contrôlée de ce nouveau type de matériau.

Elles sont fondées à la fois sur les données bibliographiques existantes en France et à l'étranger et sur les travaux réalisés par le Projet National B@P. Elles prennent en compte les projets de norme européenne en préparation.

Elles concernent la gamme des BAP utilisés en bâtiment comme en génie civil pour des classes de résistances comprises entre C25/30 et C90/105.

Elles couvrent les domaines du béton coulé en place (fabrication en centrale BPE ou sur chantier) et des produits préfabriqués de structure (à l'exclusion du chapitre 8). Pour ces derniers, des dispositions spécifiques sont prévues dans ce texte lorsque nécessaire.

Certains bétons fluides bien qu'usuellement mis en œuvre sans vibration tels les bétons de pieu ou paroi moulée, bétons immergés ou remblais auto-compactants sont exclus du cadre des présentes recommandations.

2. DÉFINITIONS

BAP (Béton Auto-Plaçant)

Béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction s'effectue par le seul effet gravitaire).

I (Intervalle d'écoulement)

Dimension (en mm) de l'espace le plus petit à travers lequel le béton doit cheminer pour remplir correctement l'élément à bétonner. L'intervalle d'écoulement I tient compte de la géométrie des coffrages, de la disposition des armatures et des différents accès à un point donné pour le béton. L'annexe A donne des éléments pour déterminer cet intervalle.

FEF (Fourchette d'étalement à la fabrication)

Gamme de valeurs d'étalement admissible à la fabrication du BAP au départ de l'unité de production.

FER (Fourchette d'étalement à la réception)

Gamme de valeurs d'étalement admissible à la réception du BAP sur chantier.

T_m (Durée pratique d'utilisation)

Durée autorisée (pour un BAP donné) entre l'heure de fabrication et la fin de la mise en œuvre.

3. CONTEXTE NORMATIF

A la date de publication des présentes recommandations, un certain nombre de documents normatifs ou réglementaires n'ont pas été mis à jour pour prendre en compte les spécificités des BAP.

La norme NF EN 206-1 est applicable avec les compléments concernant la caractérisation à l'état frais qui sont donnés au paragraphe 4.3 ci-après.

Dans le cas des produits préfabriqués en usine, ce sont les normes de produits préfabriqués qui s'appliquent avec les compléments du paragraphe 4.3.

Pour les ouvrages d'art en Marché Public, le Fascicule 65A du CCTG¹ inclut, dans une version révisée à paraître, les compléments nécessaires dans un chapitre spécifique.

En attendant la mise à jour des modes opératoires d'essais sur béton à l'état frais de la série EN 12350 et EN 12390, le fascicule de documentation FD P18-457 traite des spécificités des BAP.

Enfin, les recommandations européennes éditées en mai 2005 par EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems), BIBM (Bureau International du Béton Manufacturé), ERMCO (European Ready Mixed Concrete Organization) et EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Association) ont été prises en compte lors de la rédaction du présent texte.

4. SPÉCIFICATIONS DES BAP A L'ÉTAT FRAIS

4.1 Classification des BAP

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais et leur capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet de la gravité.

Les BAP sont classés en trois catégories (numérotées de 1 à 3) suivant leur domaine d'utilisation.

Le classement s'effectue suivant la valeur de l'intervalle d'écoulement, le type d'application (horizontal ou vertical) et l'épaisseur (dans le cas d'application horizontale) et selon le tableau ci-après :

¹ Cahier des Clauses Techniques Générales

		Application horizontale				Application verticale	
		Épaisseur \leq 300 mm		Épaisseur $>$ 300 mm			
Intervalle d'écoulement	Longueur maximale de cheminement	Inférieur à 5m	Entre 5m et 10m	Inférieur à 5m	Entre 5m et 10m	Inférieur à 5m	Entre 5m et 10m
	$I \geq 100$	①		②a	②b	②a	②b
	$80 \leq I < 100$	②a	②b	②a	②b	②a	②b
	$I < 80$	③a	③b	③a	③b	③a	③b

La catégorie 1 correspond aux BAP utilisés dans le cas de coulages horizontaux de faible épaisseur (inférieure ou égale à 300 mm) et ayant un intervalle d'écoulement supérieur 100 mm (anciennement appelés BAN - bétons auto-nivelants).

La catégorie 2 couvre principalement les BAP utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur (supérieure à 300 mm) ou pour des coulages courants en vertical. L'intervalle d'écoulement I est supérieur ou égal à 80 mm.

La catégorie 3 est réservée aux BAP pour lesquels l'intervalle d'écoulement I est inférieur à 80 mm (parties d'ouvrage exigües ou fortement ferrillées).

Pour les catégories 2 et 3, on distingue de plus deux sous-classes (2a, 2b et 3a, 3b) en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP dans le coffrage (5 m pour 2a et 3a, 10 m pour 2b et 3b).

L'entrepreneur doit définir et justifier la catégorie de BAP correspondant au type d'ouvrage (ou partie d'ouvrage) et au mode de mise en œuvre.

Note : L'utilisation d'un BAP donne des possibilités accrues d'obtenir des parements de qualité (homogénéité de teinte en particulier). Dans le cas de bétons architectoniques, il convient, comme pour les bétons ordinaires vibrés, de vérifier au tout début de l'opération que les caractéristiques du béton et les moyens de mise en œuvre sont en adéquation avec les objectifs visés.

4.2 Ouvrabilité des BAP

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

- mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams),
- mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L),
- stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

Les modes opératoires d'essai sont donnés en annexes B, C et D. Ils sont en cohérence avec les projets de normes européennes sur le sujet (EN 12350 - Parties 8, 10 et 11)².

4.3 Spécifications des BAP à l'état frais

Les propriétés requises pour le BAP coulé en place, en fonction de la catégorie, sont données ci-après :

	Cat. 1	Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 3a	Cat. 3b
Valeur maximale au tamis ⁽¹⁾	20 %	20 %	15 %	15 %	10 %
Valeur minimale à la boîte en L	Pas de prescription particulière	0,80 avec 2 barres	0,80 avec 2 barres	0,80 avec 3 barres	0,80 avec 3 barres

(1) La valeur limite autorisée au tamis ne peut en aucun cas être supérieure à 30 %, elle peut être supérieure à la valeur spécifiée dans le tableau si l'on dispose de mesures probantes de non-ségrégation pour des applications similaires (voir annexe E). Il ne doit pas y avoir de signe de ressuage lors de l'essai.

Les seuils du tableau correspondent aux valeurs à respecter au stade de la qualification de la formulation. Ils sont à respecter pendant toute la durée pratique d'utilisation Tm.

Dans le cas des éléments préfabriqués, pour lesquels des vérifications de conformité du produit fini sont prévues dans le cadre de la norme produit et le cas échéant du référentiel de certification, deux options sont possibles pour valider la formulation :

- le BAP répond aux critères du tableau précédent,
- le BAP déroge aux critères du tableau précédent ; l'absence de ségrégation (dans le domaine de la FEF) est alors vérifiée sur le produit fini à partir d'essais spécifiques (voir annexe E).

Les contrôles de réception sont essentiellement basés sur l'essai d'étalement.

La fourchette d'étalement à la réception est définie suite à l'essai de qualification (cf. chapitre 6 ci-après).

² Deux autres essais normalisés existent, le V-funnel (EN 12350-9) et le J-ring (EN 12350-12), mais ne sont pas d'application courante en France.

Elle peut être définie sur la base d'une valeur cible (et des variations admissibles) ou bien par désignation d'une classe d'étalement selon le tableau suivant :

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement.

Dans le cas de bétonnage en grande hauteur, une attention particulière est à porter sur la stabilité du béton vis-à-vis du ressuage, lequel peut nuire à l'homogénéité du béton et à la qualité du parement.

5. PRINCIPES DE FORMULATION

Des méthodes rationnelles de formulation des BAP ont été proposées dans la littérature technique et une majorité d'entre elles sont résumées dans les références [1] et [2]. Le présent chapitre est plutôt consacré aux particularités de la composition des BAP qui en découlent.

5.1 Cahier des charges minimum à l'état frais

La particularité des BAP réside essentiellement dans leurs propriétés à l'état frais.

Un BAP doit, tout d'abord, s'écouler sous son propre poids, et avec un débit suffisant. Ceci se traduit dans la pratique par un étalement et une vitesse d'étalement importants. D'un point de vue plus scientifique et considérant que le béton est un fluide de Bingham³ ceci se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles. Ces grandeurs rhéologiques peuvent être mesurées à l'aide d'un rhéomètre à béton comme le BTRHEOM-LCPC, par exemple [3].

Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, au travers de zones confinées (dans un coffrage très ferrailé, au droit d'un diaphragme...) et une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante pour cela. En effet, lors de

³ Fluide pour lequel la contrainte de cisaillement τ (Pa) est une fonction linéaire du gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ (1/s): $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$ où τ_0 est le seuil de cisaillement et μ la viscosité plastique.

l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier (cf. figure 1) et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Des voûtes peuvent ainsi se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines, et interrompre l'écoulement. Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée.

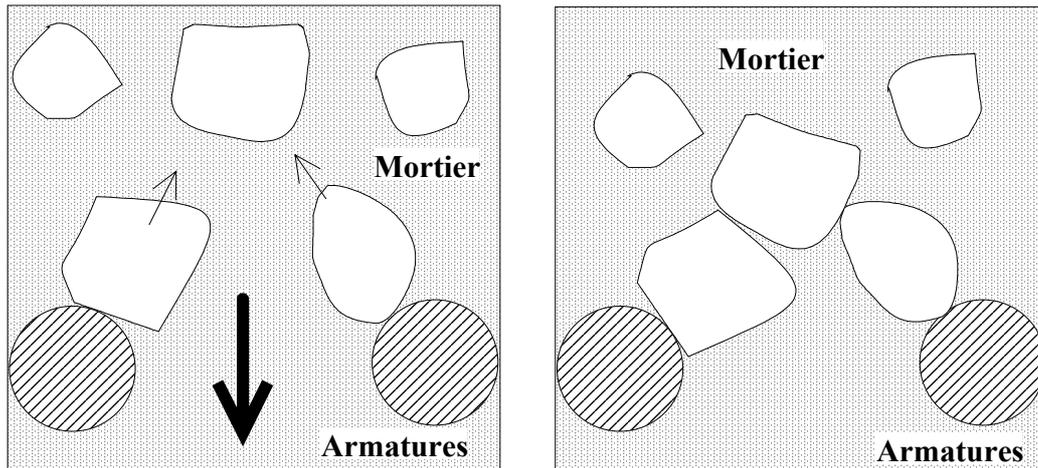


Figure 1 : phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle

Un BAP doit également avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

Ajoutons, enfin, que ces bétons sont généralement pompables.

En conclusion, la principale difficulté auquel le formulateur de BAP est confronté est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires : la fluidité ainsi que les résistances à la ségrégation et au ressuage du béton.

5.2 Particularité de la composition des bétons auto-plaçants

Un volume de pâte élevé

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l/m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres.

Une quantité de fines (particules <125 μm) élevée

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) supérieure à celle des bétons conventionnels. Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats. Toutefois, pour éviter des problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment Portland mélangé avec cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc. Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est réalisé pour répondre aux exigences de résistance à la compression à 28 jours et aux exigences de durabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme NF EN 206-1, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

L'utilisation de superplastifiants

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [4]) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un superplastifiant.

L'utilisation éventuelle d'un agent de cohésion

Ce sont généralement des dérivés celluloseux, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. De façon schématique l'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/fines élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. Ils peuvent s'avérer superflus dans le cas de BAP ayant des rapports eau/fines faibles (notamment BAP de résistance supérieure à 50 MPa). Pour la gamme intermédiaire des bétons, leur utilité est à étudier au cas par cas. Les agents de cohésion ont la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations d'eau vis-à-vis du problème du ressuage et de la ségrégation [5, 6]. Par contre, leur utilisation peut conduire suivant les produits à des problèmes de dosage en centrale (cas de dosages faibles), à des entraînements d'air excessifs [7] et à une diminution de la fluidité.

Un faible volume de gravillons

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP.

Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les

BAP. Bien évidemment ce rapport peut être revu à la hausse si le confinement est faible (dans un ouvrage peu ferrailé par exemple) ou à la baisse dans le cas contraire.

En général le diamètre maximal D_{max} des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent lorsque D_{max} augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon. Le choix d'un D_{max} plus important est donc possible mais ne se justifie que lorsque le confinement est faible.

Quelques points à surveiller...

Toute la gamme de résistances des bétons conventionnels peut être obtenue avec les BAP en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport eau sur liant. Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, ou un fort dosage en adjuvant.

Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel-dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air avant la fluidification complète du béton [8] (avant l'ajout de la totalité du superplastifiant, par exemple). En effet l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles voire impossibles lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

6. QUALIFICATION DE LA FORMULE

Il est absolument nécessaire d'appréhender, au stade de l'étude de formulation et des essais de convenance, la sensibilité du BAP aux écarts de composition et principalement aux variations de teneur en eau.

Ce n'est que lorsqu'on aura vérifié que cette sensibilité est compatible avec les méthodes et moyens de fabrication que la formule nominale pourra être validée sur la base des essais sur éprouvettes (résistance mécanique et essais complémentaires éventuels).

Au stade de l'étude, on pourra mesurer la résistance à la ségrégation du béton en fonction du dosage en eau en notant en parallèle les valeurs d'étalement, les densités (mesurées sur béton ni vibré ni piqué) et les résultats à la boîte en L correspondants. Sur cette base, on définit ensuite une plage d'étalement acceptable à la mise en œuvre (FER) et la fourchette de dosage en eau correspondante. Le principe est le suivant :

- la formule dérivée haute doit présenter une stabilité satisfaisante,
- la formule dérivée basse doit conduire à un résultat à la boîte en L correct et ne doit pas induire une dégradation de la densité par insuffisance du compactage gravitaire.

Il faut également intégrer la vérification du maintien de rhéologie pendant la Durée Pratique d'Utilisation recherchée (la valeur d'étalement doit rester incluse dans la FER jusqu'à Tm).

L'influence de la température sur la rhéologie des BAP peut conduire à adapter les dosages en adjuvants suivant les saisons et ceci pourra être évalué au stade de l'étude.

L'usage montre que beaucoup de formulations de BAP ne tolèrent pas, à l'instar des BHP, les variations d'eau de $\pm 10 \text{ l/m}^3$ mentionnées dans le Fascicule 65A du CCTG pour les bétons courants. Les écarts admissibles sont en général de $\pm 5 \text{ l/m}^3$. Toutefois, des formulations plus robustes peuvent être mises au point et notamment grâce à l'adjonction d'adjuvants tels des agents de cohésion.

A l'occasion des épreuves de convenance, indispensables pour qualifier une formule donnée sur une centrale donnée, il est recommandé de réaliser au moins trois gâchées (sur lesquelles on fait varier la teneur en eau) permettant de préciser la fourchette d'étalement admissible (FEF et FER) à partir de la vérification de la conformité des trois bétons produits.

Pour ce qui concerne la confection des éprouvettes, les dispositions du fascicule de documentation FD P18-457 spécifiques aux BAP s'appliquent, en attendant la révision de la norme NF EN 12390-2.

7. FABRICATION DU BÉTON

7.1 Généralités

L'expérience montre que les formules de BAP sont en général plus pointues que celles des bétons ordinaires et qu'il faut mettre en œuvre des précautions et contrôles particuliers.

Ces moyens spécifiques portent à la fois sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale et les procédures de fabrication et viennent en complément des prescriptions de la norme NF EN 206-1 pour les bétons coulés en place et des normes de produits pour les éléments préfabriqués en usine.

7.2 Equipement des centrales

Pour le béton coulé en place, les exigences requises en matière d'équipement et de son utilisation sont définies dans le paragraphe 9.6.2 de la norme NF EN 206-1. Dans le cadre de la Marque NF-BPE des spécifications complémentaires sont précisées dans le chapitre 2.2.3 du référentiel de certification (NF033).

Pour les éléments préfabriqués en usine, les équipements des centrales doivent permettre de satisfaire les spécifications sur le béton et le produit fini définies dans les normes de produit et le cas échéant dans les référentiels de certification (on se

référer aux Recommandations professionnelles pour les centrales à béton destinées aux éléments préfabriqués pour les marchés relevant du Fascicule 65A).

Pour la fabrication des BAP, il est recommandé d'utiliser une centrale comprenant au minimum :

- un malaxeur à fort taux de cisaillement,
- des stockages de gravillons à l'abri de la pluie et/ou un système d'évaluation fiable de l'humidité pour chacune des coupures,
- un automate permettant un cycle de fabrication entièrement automatisé,
- un wattmètre ou équivalent,
- des sondes d'humidité sur les sables.

7.3 Procédures de fabrication

Afin d'assurer une fabrication régulière et fiable de ce type de produit, il convient de définir des procédures de suivi et de contrôle dans les documents qualité du site de production, notamment dans les domaines suivants :

- contrôles des constituants,
- maîtrise de la teneur en eau des bétons et particulièrement du ou des sable(s),
- séquence de malaxage,
- prise en compte du temps de transport dans la définition de la FEF,
- fréquences de contrôle de l'étalement à la fabrication.

Lors de la fabrication de BAP, il convient d'exercer pendant la période de démarrage (les premières journées de fabrication) un contrôle continu par un technicien de laboratoire formé au BAP et si possible durant toute la durée des fabrications (au moins une fois par jour en début de fabrication).

La formulation de BAP étant qualifiée comme supportant une variation du dosage en eau de +/-X litres par mètre cube (avec X compris entre 5 et 10 l/m³), il est nécessaire de s'assurer que les procédures et le matériel utilisé permettent de rester dans ces tolérances. Ceci peut être évalué au stade de l'épreuve de convenance en réalisant trois gâchées nominales et en vérifiant la répétabilité. L'attention est attirée sur le fait qu'une tolérance de +/-5 litres par mètre cube implique des procédures et du matériel spécifiques (un indicateur fiable de la consistance en cours de malaxage est indispensable).

La séquence de malaxage doit être adaptée de façon à ce que les constituants du béton frais soient correctement dispersés, sans présence d'agglomérats d'éléments fins.

Il est recommandé de malaxer ces bétons à poste fixe le temps nécessaire à l'obtention d'une stabilisation complète du wattmètre ou de mettre en place une procédure fiable sur la mesure d'efficacité du malaxage. Dans tous les cas, le temps de malaxage ne sera pas inférieur à 35 secondes pour les résistances inférieures ou égales à 30 MPa et 55 secondes pour les autres niveaux de performances. Dans le cas de fabrication de bétons sur chantier qui ne seraient pas conservés au moins cinq minutes dans un récipient effectuant un brassage (camion-malaxeur ou trémie d'attente), le temps nécessaire de malaxage en centrale est au minimum de 55 secondes [9].

Par temps froid et lorsque l'influence de la température sur la rhéologie n'a pas été prise en compte au stade de la qualification de la formule, il y a lieu d'opérer un suivi rhéologique pendant le temps T_m afin de s'assurer que le béton reste dans la fourchette d'étalement initialement prévue (afin de garantir qu'il ne passe pas par une phase de ségrégation). Ce suivi sera opéré par exemple sur la première charge.

7.4 Adjuvantation sur site

L'adjuvantation sur site correspond à l'incorporation en camion-malaxeur sur chantier de tout ou partie du superplastifiant. Le béton primaire fabriqué dans l'installation à poste fixe doit bien sûr être spécialement étudié pour permettre l'obtention d'un BAP après adjuvantation sur site, et la transformation doit être étudiée dans le cadre de l'étude de formulation. La faisabilité industrielle doit être vérifiée par une épreuve de convenance mettant en œuvre la procédure d'adjuvantation sur site prévue, en vérifiant en particulier l'homogénéité du béton sur l'ensemble de la charge et l'absence de ségrégation.

Il convient que la classe d'affaissement du béton primaire soit au moins S3 (affaissement supérieur ou égal à 100 mm).

L'adaptation du béton final se fera sur site par adjuvantation en superplastifiant haut réducteur d'eau et éventuellement agent de cohésion, les autres adjuvants ou ajouts ayant été introduits en centrale. En aucun cas, l'ajout d'eau (autre que celle des adjuvants) n'est toléré. Les quantités d'adjuvants réellement incorporées (la mesure doit être réalisée par pesage ou dosage volumétrique) doivent être consignées sur un document de suivi. Le malaxage à poste fixe sera effectué conformément au paragraphe 7.3. Un malaxage (rotation en vitesse rapide) en camion-malaxeur sera réalisé à raison de une minute par mètre cube avec un minimum de cinq minutes. Une vérification de la consistance sera pratiquée à chaque charge avant adjuvantation sur site, puis après adjuvantation avant mise en œuvre dans l'ouvrage.

7.5 Transport

Il est recommandé d'utiliser un camion malaxeur pour lequel une vérification périodique des pales est assurée.

Les règles de l'art habituelles en matière de transport et de livraison sont à respecter. Parmi celles-ci on note l'absence d'eau dans le camion avant chargement, la propreté de la toupie, le maintien de la toupie en rotation lente pour éviter la ségrégation du béton, le réglage de la goulotte de façon à limiter la hauteur de chute du béton...

A l'arrivée sur le site (même en cas d'adjuvantation sur site), un malaxage à grande vitesse pendant au minimum une minute est effectué juste avant déchargement.

Même si les caractéristiques du béton peuvent évoluer pendant la phase de transport, il n'est pas acceptable de devoir attendre un laps de temps après la fabrication du béton pour obtenir la conformité de ce dernier, en particulier en terme de résistance à la ségrégation. En effet, il est impossible de contrôler la régularité de la production si le béton ségrège et de ce fait ne peut être échantillonné correctement.

8. RÉCEPTION DU BÉTON SUR CHANTIER

La réception du béton sur chantier doit permettre de vérifier l'aptitude du béton à être mis en œuvre sans aucune vibration et la conformité à la formule nominale.

Cette opération est essentiellement basée sur la mesure de l'étalement.

Dans le cas où seraient livrés sur chantier des bétons auto-plaçants en même temps que des bétons ordinaires, une procédure de distinction des deux types de béton est à définir.

La procédure de réception suivante est recommandée :

- prélèvement d'un échantillon de béton représentatif (si livraison en toupie, malaxage du béton à grande vitesse pendant une minute au minimum),
- réalisation de l'essai d'étalement au cône d'Abrams,
- vérification que le résultat est compris dans la fourchette d'acceptation (FER).

Il est conseillé de réaliser un contrôle de réception au minimum sur la première charge de la journée de bétonnage et systématiquement en cas de doute.

9. MISE EN ŒUVRE DU BÉTON

9.1 Les différents modes de mise en œuvre des BAP

Pendant la mise en œuvre du béton dans le coffrage, il faut respecter les hauteurs de chute et longueurs de cheminement retenues pour le choix de la catégorie de BAP. Dans le cas contraire, il faut avoir vérifié, lors d'essais préalables, l'absence de ségrégation dommageable sur le type d'élément bétonné.

De même, il convient de s'assurer que le coffrage ne présente pas de fuites.

Dans le cas de BAP de faible viscosité ($t_{500} < 2$ secondes), le délai maximal de recouvrement entre couches est de l'ordre de 90 minutes [10]. Pour des BAP plus visqueux et en particulier pour des mises en œuvre en couches de faible épaisseur (inférieure à 10 cm), ce paramètre doit être justifié par une étude spécifique (incluant éventuellement des dispositions particulières de bétonnage).

D'une manière générale, il est primordial que les équipes en charge de la mise en œuvre du béton aient été préalablement formées à la mise en œuvre du BAP.

Les règles de l'art classiques correspondant à la préparation des coffrages avant la mise en œuvre de bétons ordinaires s'appliquent également aux BAP. Il est primordial d'attacher un soin particulier à la préparation du support (étanchéité), au nettoyage (chutes de ligatures, débris), etc.

Pour les applications verticales, plusieurs méthodes de mise en œuvre des BAP peuvent être retenues parmi lesquelles :

Benne à manchette en haut de coffrage

La mise en œuvre d'un béton auto-plaçant par déversement en tête de coffrage (même en respectant une hauteur de chute inférieure à 5 m) peut donner des résultats peu satisfaisants du point de vue de la qualité d'aspect des parements (bullage).

La benne à manchette peut être utilisée pour la mise en place du BAP tout en limitant la hauteur de chute du béton dans le coffrage grâce à la réduction possible du diamètre de la manchette (80 à 100 mm au maximum).

Benne avec tube plongeur

Une seconde méthode, similaire à celle utilisée pour le bétonnage de fondations profondes, consiste à introduire un tube plongeur en immersion dans le béton, afin d'éviter la chute du béton frais dans les coffrages. Cette méthode présente l'avantage de couvrir systématiquement toutes les précautions de mise en œuvre évoquées dans le paragraphe ci-dessus. Le maintien du tube dans le béton pendant le coulage permet de limiter l'introduction d'air lors de la mise en œuvre.

Le diamètre du tube plongeur doit être adapté à la géométrie des coffrages (hauteur et épaisseur) ainsi qu'à la densité d'armatures en place (des cheminées de bétonnage doivent être prévues). Le diamètre du tube plongeur doit évidemment être adapté à la taille maximale des granulats entrant dans la composition du BAP afin de minimiser le risque de formation de bouchon dans le tube (règles de pompage usuelles).

Un entonnoir doit être installé à l'entrée du tube plongeur pour faciliter l'introduction du béton dans le tube.

Pompe (avec tube plongeur)

Une solution alternative à la benne avec tube plongeur consiste à utiliser la pompe qui peut permettre d'optimiser les cadences de mise en œuvre du béton.

Le pompage est, a priori, une méthode de mise en œuvre adaptée aux BAP, étant donné que ces derniers sont obligatoirement pompables du fait de leur principe de formulation. L'attention des utilisateurs est attirée sur la possible évolution de fluidité du BAP lors d'un passage à la pompe.

Il n'est en général pas indispensable, pour de courtes distances de pompage, d'utiliser une barbotine d'amorçage. Les premiers 100 à 200 litres de BAP peuvent être utilisés pour lubrifier le circuit et préférablement réintroduits dans le camion toupie pour homogénéisation avec le reste de la charge.

En bas de coffrage : pompe avec une pipe d'injection

La dernière méthode consiste à mettre en place le béton à la pompe par le bas des coffrages. Cette méthode, qui nécessite l'utilisation de coffrages équipés de pipes d'injection en partie basse, évite la chute du béton dans le coffrage et limite le personnel de chantier à la personne chargée de contrôler la pompe.

Le système d'injection du béton en pied de banche doit être étudié de manière à limiter le rebond du béton sur la face opposée du coffrage (inclinaison de la pipe d'injection ou interposition d'une plaque de déflexion dans le coffrage en face de la pipe) et permettre une fermeture aisée de la réservation à la fin du bétonnage (trappe coulissante).

Pour les applications horizontales, les BAP peuvent être mis en œuvre par déversement direct depuis la goulotte de la toupie, à la benne à manchette ou à volant, ou par pompage. Le traitement de surface est effectué de préférence au moyen d'une barre dite de "débullage".

9.2 Les coffrages

9.2.1 Préparation

Compte tenu de la consistance très fluide des BAP, une attention particulière est à apporter sur l'**étanchéité** des coffrages, notamment en pied où elle peut être assurée au moyen de talonnettes ou de joints spéciaux. Cependant, grâce à la cohésion des BAP, de légers défauts d'étanchéité (typiquement inférieurs à 2 mm) restent tolérables et n'altèrent en général pas l'aspect de parement.

Comme pour les bétons vibrés, lorsqu'un aspect soigné de parement est souhaité, une attention particulière doit être portée sur la propreté des coffrages (c'est-à-dire que la peau coffrante doit être exempte de graisse, de laitance et de rouille dans le cas de coffrages métalliques).

De même, il est conseillé d'appliquer une huile de décoffrage de qualité par pulvérisation en déposant un voile uniforme et non ruisselant. Le surplus d'agent de démoulage peut être éliminé par passage d'un chiffon ou raclette ou autre système adapté. Un excès d'huile peut favoriser le bullage et une désactivation du béton en surface.

9.2.2 Résistance des coffrages à la poussée des BAP

Il est très important de dimensionner les coffrages pour résister à la pression générée par les BAP pendant et après le coulage du béton.

Certains BAP présentent des propriétés thixotropiques à l'état frais qui leur permettent, à condition d'être mis en place par le haut du coffrage, de générer des poussées inférieures à celles données avec des bétons dits classiques. Il n'existe à l'heure actuelle pas d'essais reconnus permettant de quantifier cette thixotropie et d'en apprécier l'impact sur la pression exercée au niveau des coffrages. De plus, la thixotropie dépend de la température du béton frais et peut être altérée par des vibrations transmises au béton après sa mise en œuvre sur chantier (circulations d'engins...). Une méthode indirecte permettant de prendre en compte la thixotropie consiste à contrôler les efforts de traction dans les tiges de coffrage et à vérifier ainsi que la vitesse de remplissage laisse le temps au béton de se gélifier en partie inférieure.

Il convient de prendre en compte qu'un des avantages indéniables des BAP est de permettre une augmentation des cadences de bétonnage entraînant de fortes vitesses de montée du béton dans les coffrages ne permettant pas de bénéficier du caractère éventuellement thixotrope du BAP. Une étude réalisée sur le site expérimental du PN B@P à Guerville a montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages est égale à la pression hydrostatique (pression maximale que peut exercer un béton sur une paroi) lorsque la vitesse de montée du béton dans l'ouvrage est supérieure ou égale à 12 m/h [11].

Il est donc fortement recommandé de dimensionner les coffrages pour résister à la pression hydrostatique sauf si une étude particulière a été menée sur ce sujet.

Il est primordial de vérifier que les coffrages, l'étalement et le renforcement sont adaptés et justifiés pour résister à la pression en partie basse du coffrage, c'est-à-dire là où elle est la plus élevée. Il est également indispensable d'utiliser des mannequins et des réservations renforcés et étanches. De plus, les réservations, fourreaux et boîtiers doivent être convenablement fixés afin de ne pas bouger pendant le coulage du BAP.

Dans le cas de béton pompé / injecté par le bas, en plus de la pression exercée par le béton il faut considérer les effets dynamiques locaux dus à l'injection. L'inclinaison des pipes d'injection qui permet de limiter le rebond du béton sur la face opposée du coffrage est donc recommandée.

9.3 Recommandations sur la hauteur de chute et la longueur de cheminement des BAP

Dans le cas d'une mise en œuvre du béton par déversement en tête du coffrage, la hauteur de chute doit être limitée à **5 m** sauf étude particulière. Pour l'optimisation de la qualité d'aspect des parements, la hauteur de chute des BAP dans les coffrages devra être limitée au maximum.

D'une manière générale, plus la distance de cheminement devient longue, plus le béton est susceptible de manifester de la ségrégation dynamique. C'est pourquoi, quelle que soit la méthode retenue pour mettre en place le béton frais, il est indispensable de limiter la longueur de cheminement horizontal du BAP dans les coffrages à une longueur maximale comprise entre **5 et 10 m** de part et d'autre du point de distribution (suivant la catégorie du BAP). Etant donné que la distance admissible de cheminement est liée à la difficulté du béton à se déplacer dans les coffrages (densité d'armatures, coudes, présence de réservations...), la formule de BAP retenue devra prendre en considération les paramètres donnés dans le tableau du paragraphe 4.3 du présent document.

9.4 La finition et la cure des BAP

L'absence de ressuage et l'aspect éventuellement thixotrope des BAP peut rendre la finition des dalles quelquefois malaisée. La finition du BAP en application horizontale doit donc obligatoirement être réalisée immédiatement après la mise en œuvre du béton. Il est recommandé d'utiliser une batte de chapiste afin d'obtenir une finition acceptable de la surface horizontale.

Une quantité de pâte (liant + eau) relativement plus importante dans les BAP par rapport aux bétons ordinaires, pourrait les rendre plus vulnérables vis-à-vis de la dessiccation, d'autant plus que les BAP sont susceptibles de peu ressuier. Cependant cette sensibilité à perdre de l'eau peut être très différente d'une formule de béton à une autre, en fonction des types d'additions utilisées comme fines en substitution partielle et en complément du ciment. D'une manière générale, il est recommandé d'être particulièrement vigilant aux moyens de cure à mettre en œuvre après le bétonnage afin d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures du durcissement. Il convient donc d'appliquer de façon stricte les règles définies pour la cure des bétons ordinaires, pour le cas des BAP.

Pour les applications horizontales, il est recommandé d'appliquer une cure immédiatement après la mise en œuvre du béton afin d'éviter une évaporation trop importante, source de fissuration précoce et de diminution des propriétés de durabilité du béton d'enrobage [12]. Dans le cas d'une utilisation d'un produit de cure, ce dernier devra être compatible avec la pose éventuelle ultérieure d'un revêtement de finition.

10. PROPRIÉTÉS DU BÉTON DURCI

On s'intéresse ici principalement aux déformations instantanées et différées des BAP, c'est-à-dire aux calculs du module instantané, du retrait et du fluage pour lesquelles les spécificités de composition des BAP laissent présager des différences de caractéristiques par rapport aux bétons ordinaires.

Les autres propriétés (telles que l'adhérence aux armatures, la résistance en traction et la durabilité) ne diffèrent pas significativement de celles prises en compte pour les bétons ordinaires en fonction de leur composition.

10.1 Déformations instantanées et différées

La proportion volumique en granulats des BAP réalisés habituellement en France est comprise entre 53 % et 67 %. Celle des bétons vibrés est plutôt comprise entre 66 % et 73 %.

Les propriétés de déformation du béton (module, fluage, retrait) sont fonction des caractéristiques de chaque phase et de leur proportion. Des études expérimentales et théoriques ont montré qu'en prenant un même jeu de constituants et une même composition de la pâte liante, les déformations du béton augmentent lorsque le volume de pâte augmente [13]. Celles des BAP devraient donc être en moyenne plus grandes que celles des bétons vibrés. A la lecture de la littérature spécialisée, il apparaît que cette augmentation des déformations, bien que réelle, n'est cependant pas aussi marquée que celle prévue par les modèles de calcul. D'une part la diversité des formulations et en particulier des additions minérales utilisées conduit à une diversité de comportements. D'autre part, les expériences mettent en effet en évidence une contribution non négligeable des additions minérales, mêmes celles non pouzzolaniques, aux propriétés du béton durci [14], [15], [16]. Ainsi, des performances mécaniques significativement supérieures à celles de la classe visée peuvent amoindrir la déformabilité et compenser l'effet du volume de pâte.

Une analyse détaillée des propriétés de déformation instantanée et différée des BAP est proposée en annexe F. Bien qu'il ne ressorte pas d'altération majeure de comportement, pour les applications nécessitant la prise en compte des caractéristiques correspondantes, des essais au cas par cas sont recommandés.

10.2 Durabilité

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en termes de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction). Les règles applicables pour les bétons ordinaires restent valables pour les bétons auto-plaçants (norme NF EN 206-1, Fascicule 65A du CCTG, normes de produits préfabriqués). On pourra se reporter à l'annexe G pour plus de détails.

10.3 Autres propriétés

Le rapport entre résistance en traction et résistance en compression des BAP est a priori peu différent de celui des bétons ordinaires [17]. Toutefois, il est conseillé, lorsque la résistance en traction présente une importance particulière pour une application donnée, d'effectuer des mesures au niveau des essais de qualification de la formulation.

L'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des bétons ordinaires.

Dans certaines configurations (nappes supérieures de pièces épaisses), la meilleure stabilité des BAP vis-à-vis du ressuage élimine les défauts rencontrés avec certains bétons ordinaires et peut améliorer l'enrobage des armatures [18].

Les parements obtenus avec les BAP sont potentiellement meilleurs qu'avec les bétons ordinaires en particulier pour ce qui concerne les défauts liés à l'étanchéité des coffrages et à la vibration. L'obtention de teintes plus homogènes est possible. Par contre, les BAP peuvent présenter des phénomènes de bullage liés à leur résistance à la ségrégation. Pour limiter ce bullage, il convient d'optimiser les méthodes de mise en œuvre et d'utiliser des fluidités élevées dans les limites de stabilité acceptables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Chapitre 4 (Mix Design) des Actes du First RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, pp 309-410, Stockholm, 13-15 septembre 1999.
- [2] Sedran T. : "Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants", Thèse de l'ENPC, 220 p, mars 1999.
- [3] de Larrard F., Hu C., Sztikar J.-C., Joly M., Claux F. and Sedran T. : "Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides", Annales de l'ITBTP, No. 527, octobre 1994.
- [4] de Larrard F., Bosc F., Catherine C., and de Florenne F. : "La nouvelle méthode des coulis de l'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées No. 202, pp 61-69, mars-avril 1996.
- [5] Kuroiwa S., Matsuoka Y., Hayakawa M., and Shindoh T. : "Application of Super Workable Concrete to Construction of a 20-Story Building", American Concrete Institute SP140, "High Performance Concrete in Severe Environments", Detroit, pp 163-186, 1993.
- [6] Shindoh T., Matsuoka Y. Tangtermsirikul S. and Sakamoto J. : "Effect of Variation of Material Quality on Properties of Super Workable Concrete", Transactions of Japan Concrete Institute, vol 14, pp 71-78, 1992.
- [7] Pleau R., Beaupré D., Khayat K., Bona B., and Lacombe P. : "Entraînement de l'air et résistance au gel des bétons autonivelants", Colloque sur les bétons autonivelants, ed. Kamal Khayat, Sherbrooke, Quebec, 1er novembre 1996.
- [8] Botte, Burdin, Zermatten : "SCC Tunnel Applications : Cleuson Dixence Project", Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, 13-15 septembre 1999.
- [9] Schell R. : "Axe 3.1 : Synthèse Fabrication et Transport des BAP", Projet National B@P, LC/04/BAP/3.1/143, décembre 2004.
- [10] Bonnard V., Cussigh F. : "Etude de la relation entre la thixotropie et le délai maximal de recouvrement d'un BAP", Projet National B@P, LC/06/BAP/A/185, septembre 2006.
- [11] Durot D. : "Pression sur les coffrages : réalisation d'une série de capteurs et essais en vraie grandeur", Projet National B@P, Dossier 01.2.012-2, janvier 2004.
- [12] Loukili A., Turcry P. : "Etude du retrait plastique, du retrait endogène et du retrait de dessiccation des BAP au très jeune âge", Projet National B@P, mars 2004.

- [13] Le Roy R. : "Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances", Etudes et Recherches OA 22, LCPC Paris, 377 p., 1996.
- [14] Sedran T. : "Self Compacting Concrete - Report for task 4", Projet Européen SCC, LCPC, 2000
- [15] Poppe A.M., Schuiter G.D. : "Cement hydration in the presence of high filler contents", Cement and Concrete Research, 35, pp. 2290-2299, 2005.
- [16] de Larrard F. : "Concrete mixture proportioning, a scientific approach" E et FN SPON, Londres, 1999
- [17] Fukute T., Moriwake A., Sano K., Hamasaki K. : "Development of superworkable concrete for multi-functional port structures", 2nd International Symposium of CANMET/ACI, Las Vegas, pp.335-336, 1995.
- [18] Khayat K.H., Manai K., Trudel A. : "In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, novembre-décembre 1997.

ANNEXE A : DÉTERMINATION DE L'INTERVALLE D'ÉCOULEMENT

1. Définition

L'intervalle d'écoulement I est la dimension (en mm) de l'espace le plus petit à travers lequel le béton doit cheminer pour remplir correctement l'élément à bétonner.

C'est une grandeur qui est caractéristique d'une partie d'ouvrage bétonnée en une seule fois et qui permet de quantifier la sévérité du confinement contrariant la mobilité du béton, prenant en compte les conditions géométriques, les divers inserts rencontrés (ferraillage, réservations précontrainte, ...) et la méthodologie de bétonnage.

2. Méthode de détermination

L'intervalle d'écoulement I est à déterminer à partir des plans de ferraillage et de coffrage, en prenant en compte, si nécessaire, certaines dispositions constructives (mise en place de boîtes d'attente de ferraillage type STABOX par exemple).

Il ne doit pas être calculé sur la base d'un obstacle ponctuel que le BAP peut contourner (nœuds d'aciers passifs par exemple) mais en mesurant la distance caractéristique correspondant par exemple à un maillage d'aciers passifs (à pas répétitif constituant un tamis pouvant contrarier l'écoulement du béton). En particulier, l'enrobage des armatures ne constitue pas une base de calcul de I dans la mesure où le BAP peut remplir la zone d'enrobage en encerclant les aciers sans qu'il y ait réellement cheminement du béton entre les aciers et le coffrage.

3. Exemples

- Voiles de bâtiment d'épaisseur 16 cm, enrobage 2 cm avec deux nappes de treillis soudé $\varnothing 6$ mm (maille 200 mm x 200 mm) :
$$I = 160 - 2 \times 20 - 2 \times 6 = 108 \text{ mm (espace libre entre les deux nappes de treillis soudé)}$$
- Semelle de pile de pont avec un ferraillage inférieur de maille 100 mm x 100 mm en HA32 :
$$I = 100 - 32 = 68 \text{ mm (espace libre entre les armatures).}$$
- Radier de bâtiment avec un ferraillage inférieur de maille 80 mm x 100 mm en HA20 :
$$I = 80 - 20 = 60 \text{ mm (espace libre entre les armatures).}$$

ANNEXE B : ESSAIS D'ÉTALEMENT AU CÔNE D'ABRAMS

1. Objet

L'essai d'étalement au cône d'Abrams (ou slump-flow) est utilisé pour caractériser la fluidité du béton auto-plaçant.

2. Matériel nécessaire

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté (le défaut de planéité est au plus de 3 mm), marqué de deux cercles concentriques : le premier de diamètre 210 mm \pm 1 mm et le deuxième de diamètre 500 mm \pm 1 mm (voir figure 1)
- Cône d'Abrams (norme NF EN 12350-2) et un contrepoids cylindrique s'opposant au soulèvement lors du remplissage (ce contrepoids étant utilisé lorsque le test n'est réalisé que par une personne). En alternative au contrepoids, le cône pourra disposer d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre la plaque avec les pieds par l'opérateur lors du remplissage.
- Mètre ou réglet de longueur au moins supérieure à 90 cm.
- Niveau à bulle

3. Mode opératoire

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le cercle de diamètre 210 mm du plateau.
- Si nécessaire, placer le contrepoids sur le cône.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Mesurer le temps t_{500} qui correspond au temps entre le début de lever le cône et le premier contact du béton avec le cercle de diamètre 500 mm.

- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer (au millimètre le plus proche) le diamètre final (d_m) et son diamètre perpendiculaire (d_r).
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : "682/700 mm". Si les deux valeurs diffèrent de plus de 50mm, l'essai doit être invalidé et reconduit.
- Exprimer le résultat final en terme de moyenne des deux valeurs obtenues, en arrondissant à 10 mm près) : $SF = (d_m + d_r)/2$
- Le temps t_{500} doit être arrondi à 0,5 s près.

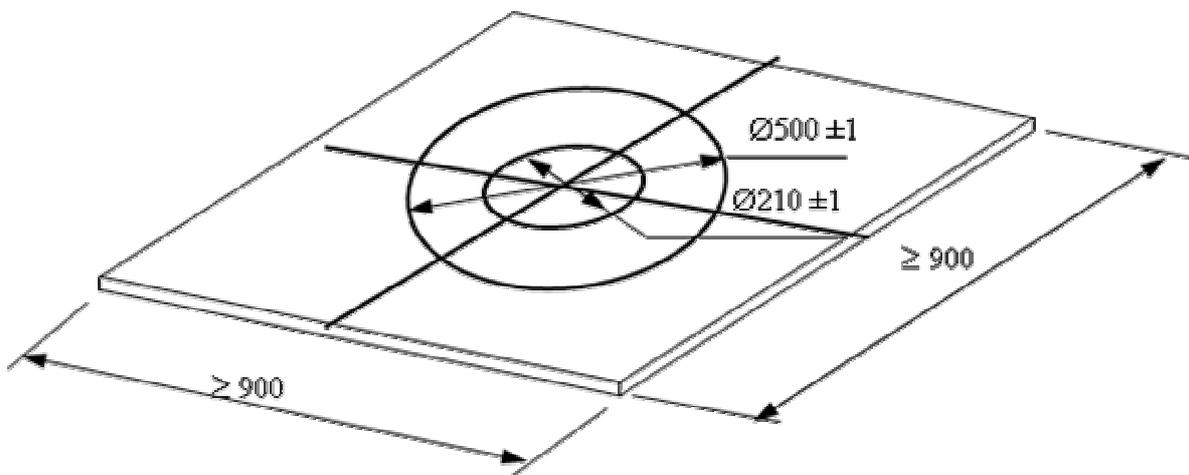
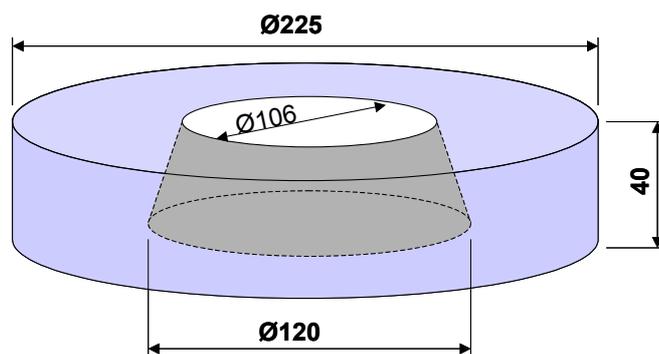


Figure 1 : La plaque d'étalement



Densité du matériau : 7,8 ~ 7,9 g/cm³

Note : toutes les dimensions sont à ±2 mm

Figure 2 : Le contrepois

4. Précision

La répétabilité r et la reproductibilité R ont été déterminées à partir d'un programme incluant 8 laboratoires, 16 opérateurs et 2 répétitions et interprétées en accord avec la norme ISO 5725 :1994.

Etallement SF	< 600 mm	entre 600 et 700 mm	> 700 mm
Répétabilité r (mm)	/	42	22
Reproductibilité R (mm)	/	43	28
Temps t_{500}	< 3,5 s	entre 3,5 et 6 s	> 6 s
Répétabilité r (s)	0.66	1.18	/
Reproductibilité R (s)	0.68	1.18	/

ANNEXE C : ESSAIS A LA BOITE EN L

1. Objet

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Deux variantes existent : l'essai à 2 barres et l'essai à 3 barres (ce dernier est représentatif de structures fortement armées).

2. Matériel nécessaire

Le plan détaillé de la boîte en L est en figure 1.

3. Mode opératoire

Le principe de l'essai à la boîte en L (L-Box) est décrit en figure 2.

On s'assure que la boîte est placée sur un support horizontal et on humidifie l'intérieur.

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute.

Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 41 mm dans la configuration à trois barres qui correspond à des ouvrages de génie civil très ferraillés (typiquement 100 à 350 kg/m³ avec un espace libre entre les barres d'au moins 60 mm). Pour des ouvrages moins ferraillés (application en bâtiment en particulier), on pourra alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre entre les barres de 59 mm (cf. figure 3).

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 (cf. figure 2) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage $PA = \frac{H2}{H1}$ en arrondissant à 0,05 près. On mesure H1 du côté de la trappe (i.e. côté intérieur de la partie verticale de la boîte, voir figure 1).

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en amont de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

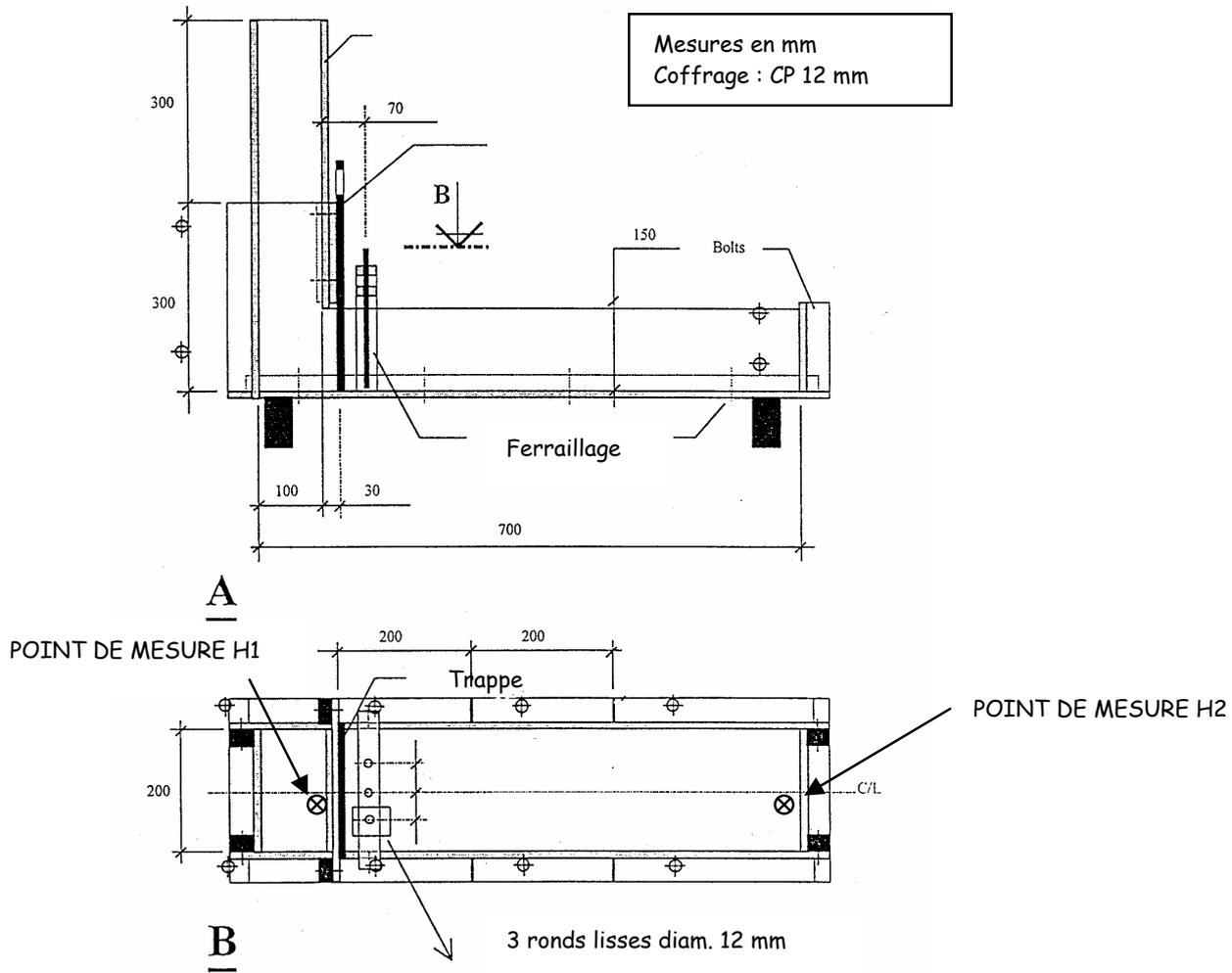


Figure 1

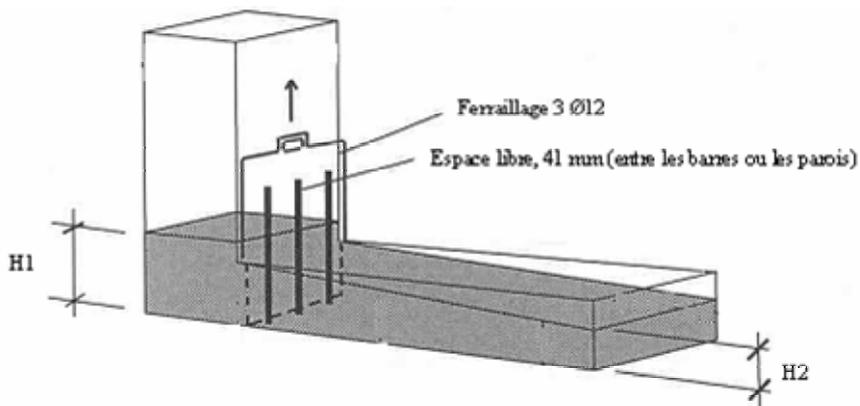


Figure 2

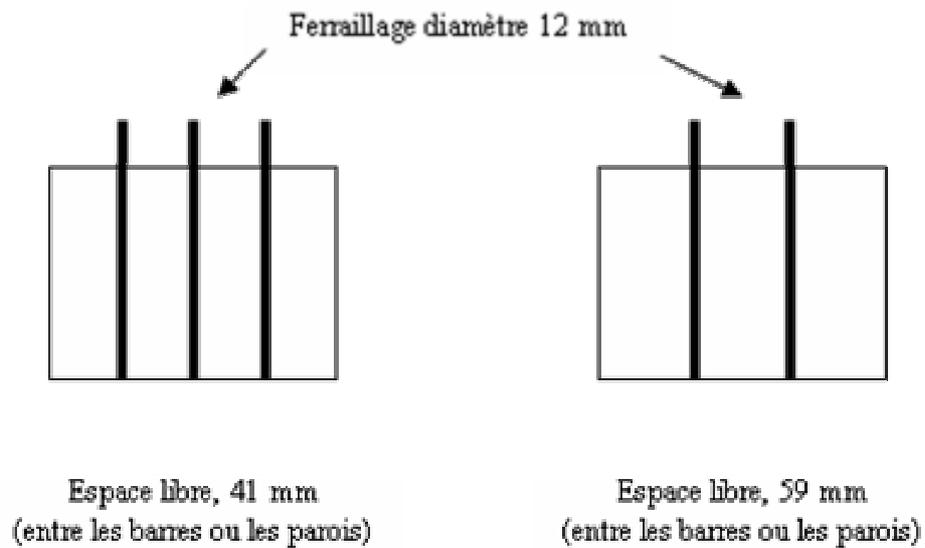


Figure 3

4. Précision

La répétabilité r et la reproductibilité R ont été déterminées à partir d'un programme incluant 11 laboratoires, 22 opérateurs et 2 répétitions et interprétées en accord avec la norme ISO 5725 :1994.

Les valeurs de r et R pour l'essai avec trois barres sont données dans le tableau suivant :

Taux de remplissage - PA	$\geq 0,8$	$< 0,8$
Répétabilité r	0,11	0,13
Reproductibilité R	0,12	0,16

ANNEXE D : ESSAI DE STABILITÉ AU TAMIS

1. Objet de l'essai

Cet essai vise à qualifier les bétons auto-plaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

2. Matériel utilisé

- Seau de 10 litres avec un diamètre intérieur de 240 mm (plus ou moins 30 mm)
- Tamis d'ouverture 5 mm de diamètre 315 mm (tamis à tôle perforée selon norme NF EN 933-2) plus fond.
- Bascule - précision minimale 20 g, portée minimale 20 kg.

3. Mode opératoire

- Echantillonnage :
 - en laboratoire :*
malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement < 30 s.
 - sur chantier, BPE livré en camion malaxeur :*
malaxer à grande vitesse pendant 1 minute
remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion
 - sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne :*
prélever 10 litres de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation
- Attendre 15 minutes
- Peser le fond et le tamis à vide
- Peser le fond seul
- Poser tamis + fond sur la bascule
- Faire la tare

- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg ± 0,2 kg
- Verser au centre du tamis - hauteur de chute du béton de 50 cm ± 5 cm
- Noter la masse réelle lue de l'échantillon
- Attendre 2 minutes
- Retirer le tamis et le fond
- Faire le zéro
- Peser le fond avec la laitance . On a Plaitance = Pfond + laitance - Pfond
- Calculer le pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon, en arrondissant au pour cent près :

$$SR = \frac{\text{Plaitance} \times 100}{\text{Péchantillon}}$$

- Noter la présence éventuelle de ressuage.

4. Précision

La répétabilité r et la reproductibilité R ont été déterminées à partir d'un programme incluant 11 laboratoires, 22 opérateurs et 2 répétitions et interprétées en accord avec la norme ISO 5725 :1994.

Les valeurs de r et R sont données dans le tableau suivant :

Pourcentage de laitance SR %	≤ 20	> 20
Répétabilité r %	3,7	10,9
Reproductibilité R %	3,7	10,9

ANNEXE E : VÉRIFICATION DE L'HOMOGENÉITÉ EN PLACE DU BAP

La méthode est inspirée de celle décrite dans le manuscrit de thèse de T. Sedran et repose sur l'appréciation de l'enfoncement des granulats depuis la surface.

Des échantillons de béton sont prélevés par carottage ou sciage de manière à obtenir des surfaces découpées perpendiculaires à la surface du béton.

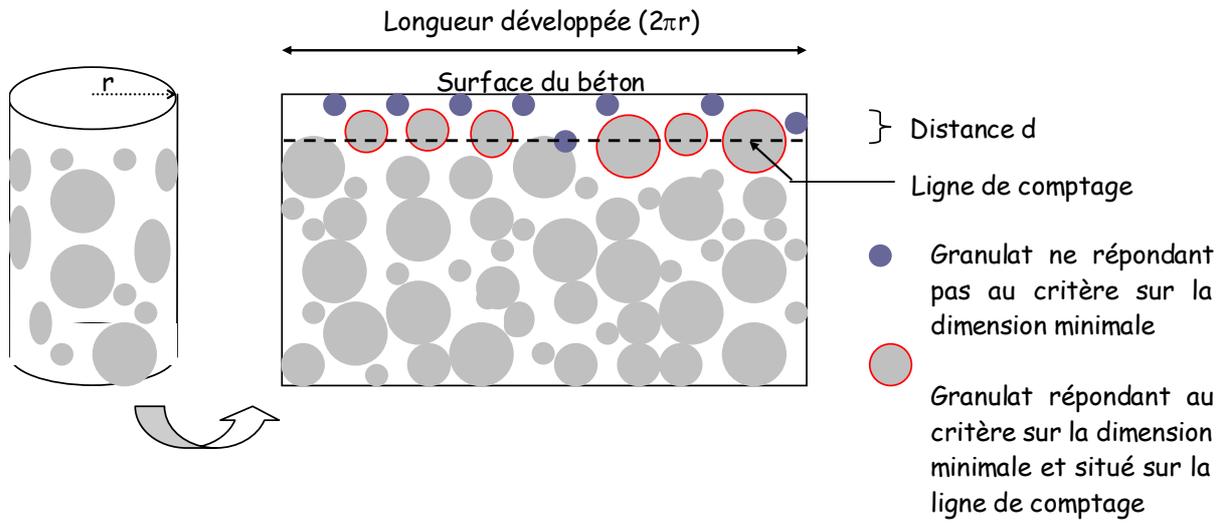
Une ligne, dite ligne de comptage, est tracée sur les éprouvettes à une distance d de la surface (voir tableau ci-dessous). La longueur de la ligne de comptage dépend de la taille des granulats (D_{max}).

L'absence de ségrégation est considérée comme vérifiée quand il existe sur la ligne de comptage au moins N granulats, de dimension supérieure ou égale à une valeur critique fonction de D_{max} (voir tableau ci-dessous, 4ème colonne).

D_{max} (mm)	Longueur (L_c) de la ligne de comptage (mm)	Distance d entre la ligne de comptage et la surface (mm)	Dimension minimale des granulats retenus pour le comptage (mm)	Absence de ségrégation si le nombre de granulat sur la ligne de comptage est \geq à
10	$600 \leq L_c^* \leq 800$	5	5	10
12	$600 \leq L_c \leq 800$	6	6	9
16	$600 \leq L_c \leq 800$	8	8	7
20	$600 \leq L_c^{**} \leq 800$	10	10	5
22	$750 \leq L_c \leq 1000$	10	11	5
31	$900 \leq L_c \leq 1200$	10	16	5

* soit par exemple 4 carottes de diamètre 50 mm pour un D_{max} de 10 mm

** soit par exemple 3 carottes de diamètre 80 mm pour un D_{max} de 20 mm



ANNEXE F : DÉFORMATIONS INSTANTANÉES ET DIFFÉRÉES DES BAP

Dans cette partie on étudie les conditions d'application des normes européennes EN 1992-1 et EN 1992-2, dites EC2, à la prévision des propriétés des BAP, à savoir le module, le retrait et le fluage.

1. Module instantané

Une étude spécifique réalisée au sein du PN BAP a porté sur la variation des propriétés du béton en fonction de la concentration en pâte [LOU 06]. Les valeurs expérimentales de modules (cf. figure 1) de cette étude montrent une augmentation des déformations instantanées avec la concentration en pâte, ou, autrement dit, une augmentation du module avec la concentration granulaire. Lorsqu'on considère l'ensemble du jeu de données (cf. figure 2) [LOU 06, TUR 05, PON 02, STA 05, LER 96, SED 00, CUS 05, DEH 05], la variation du module en fonction du volume de la matrice est partiellement compensée par les variations d'autres paramètres (en particulier la nature des granulats ou le niveau de résistance en compression), ce qui limite la possibilité de corriger la loi réglementaire par une fonction de la concentration granulaire.

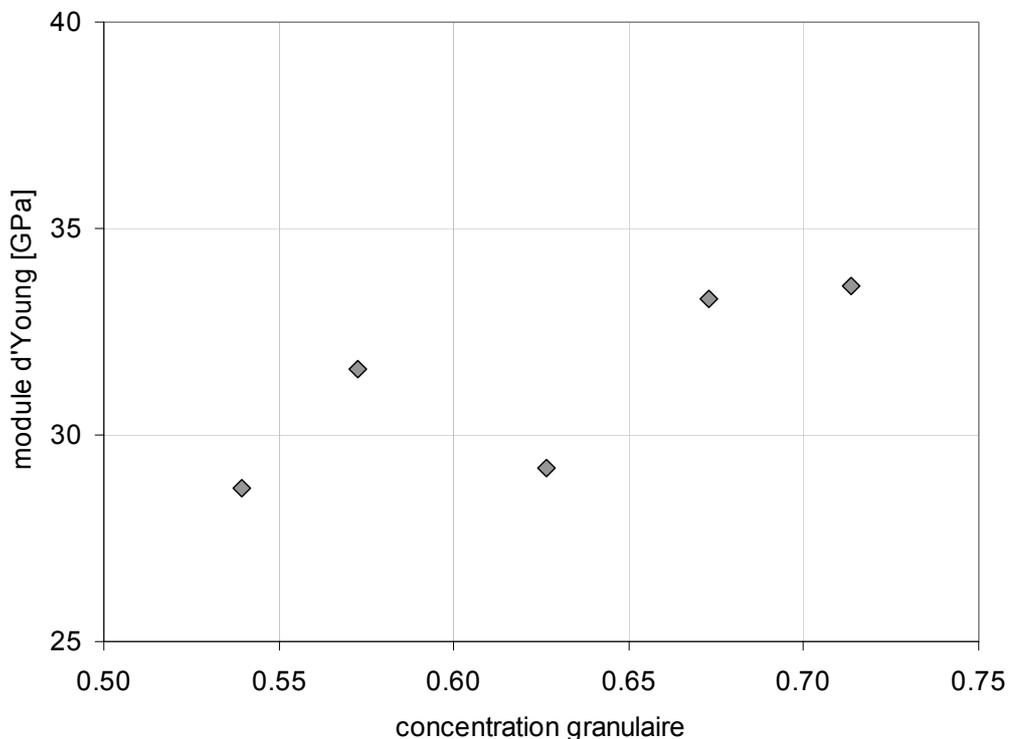


Figure 1 : valeurs expérimentales pour un même jeu de constituants et une formulation unique de pâte de ciment [LOU 06].

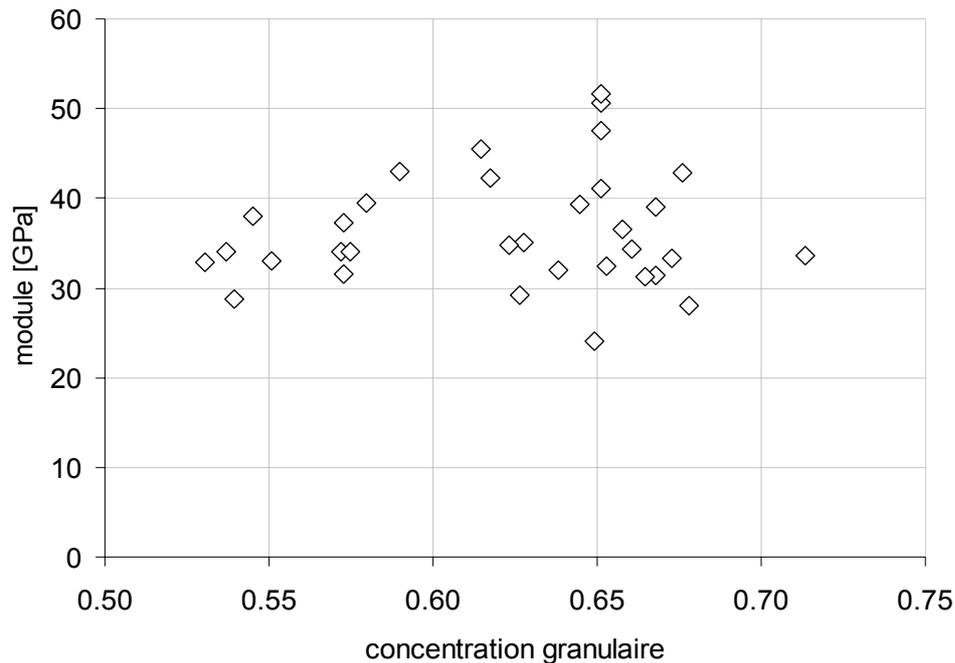


Figure 2 : valeurs expérimentales obtenues sur l'ensemble du jeu de données

L'EC2 propose le calcul approché du module sécant instantané moyen du béton, en [GPa], en fonction de la résistance moyenne, en [MPa], suivant la formule empirique suivante :

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$$

Selon l'EC2, cette expression est donnée pour des granulats de quartzites ; le module est à augmenter de 20 % pour des basaltes, à diminuer de 10 % pour des granulats calcaire et de 30 % pour des granulats de grès. De ce fait, en fonction de la nature du granulat, le module théorique du béton peut donc varier dans une plage importante (de 21 à 37 GPa pour un béton de résistance moyenne de 30 MPa par exemple).

On peut noter qu'au-delà d'une résistance moyenne de 30 MPa, en appliquant la relation donnée par l'EC2 ($f_{ck} = f_{cm} - 8$ [MPa]) pour passer de la résistance moyenne à celle caractéristique, la formule de base de l'EC2 prévoit un module inférieur à celui donné par la loi du BPEL, et cela d'autant plus que la résistance est élevée. En se référant au jeu de données utilisé dans [LER 96c], on constate en effet (cf. figure 3) que la loi EC2 sous estime sensiblement le module des bétons vibrés couramment utilisés en France⁴.

⁴ Cette sous-estimation peut provenir de la valeur plus élevée en moyenne des modules des granulats ou de l'utilisation des méthodes de formulation fondées sur l'optimisation granulaire.

La régression linéaire donne un coefficient directeur de 0,84. Ce coefficient n'a cependant pas de sens puisque le coefficient de corrélation est très faible ($r = 0,3$).

L'application de l'EC2 aux BAP est donnée figure 4. La précision est meilleure que pour les bétons vibrés. La loi surestime les modules les plus faibles mais sa précision s'améliore vers les modules élevés (les données sont cependant moins nombreuses). Une régression linéaire des points de la figure 4 donne un coefficient directeur de 1,04 ($r = 0,55$). Si l'on ne considère que les points correspondant à des modules supérieurs ou égaux à 30 GPa, le coefficient directeur descend à 1,016, ce qui est une valeur proche de la bissectrice. La surestimation de la loi de l'EC2 est donc plus sensible pour les bétons de faibles modules (inférieurs à 30 GPa).

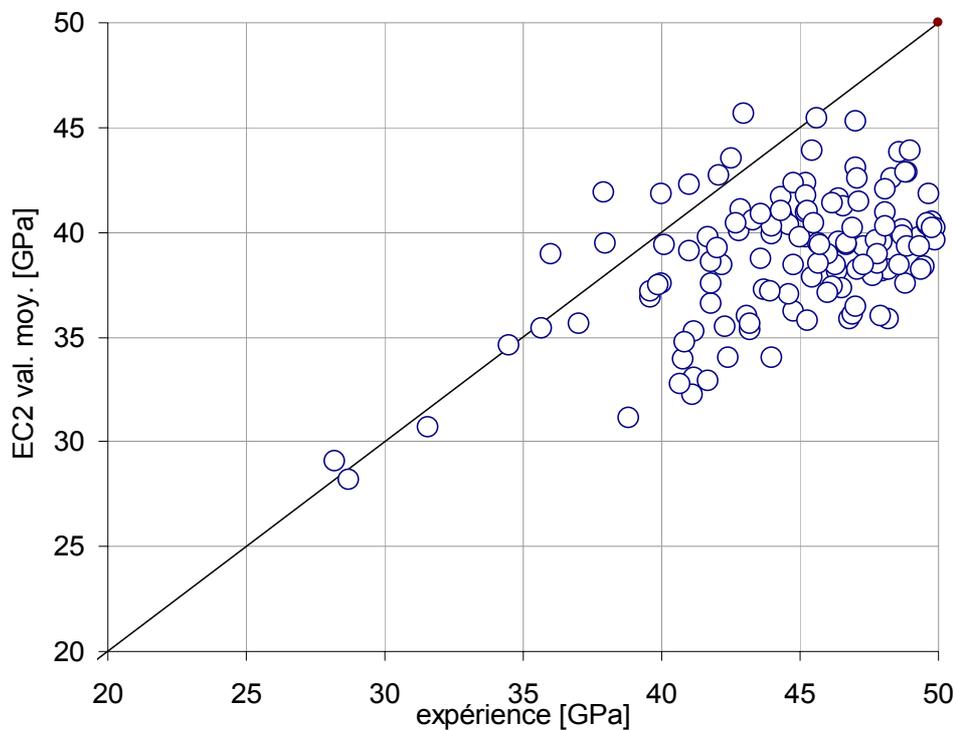


Figure 3 : comparaison entre les valeurs expérimentales de bétons vibrés et les prévisions sur le module données par l'EC2. Points expérimentaux issus de [LER 96c].

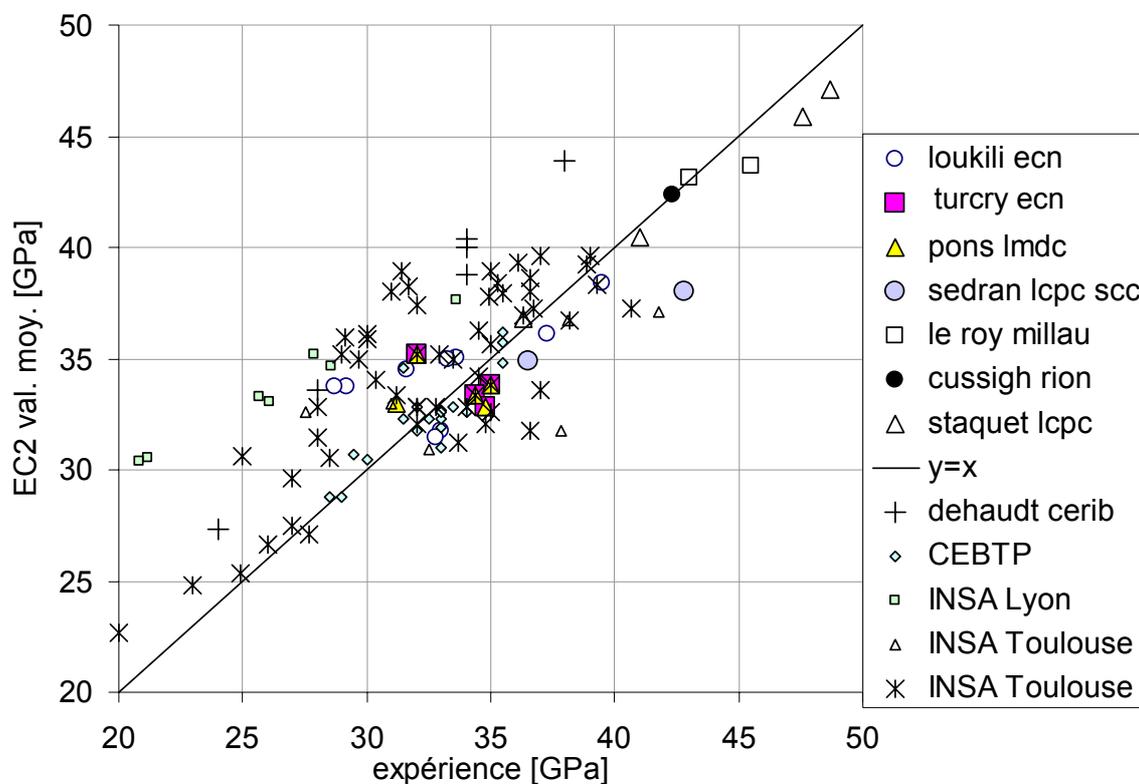


Figure 4 : comparaison entre les valeurs expérimentales de BAP et les prévisions sur le module données par l'EC2.

En conclusion, le module des BAP est en moyenne plus faible que celui des bétons vibrés. Il n'est pas rigoureux d'annoncer un pourcentage de différence, mais les régressions, aussi peu précises soient elles, annoncent une différence moyenne de 24 %. Cette différence conduit à l'amélioration de la précision de la loi de l'EN 1992-1 pour la prévision du module des BAP (en comparaison avec le cas des bétons ordinaires). L'usage de la loi EC2 peut donc être acceptée dans les cas courants. Dans le cas où la structure est sensible aux écarts de module, il conviendra de procéder à des mesures dès que la formule de béton est arrêtée ou au moins de réaliser des simulations à l'aide de modèles physiques [DEL 00, LER 96a]. La précision sera améliorée en ajustant les paramètres du modèle sur des modules de bétons réalisés avec les granulats de même origine que ceux du projet.

2. Retrait

2.1 Comparaison des modèles réglementaires

L'EC2 propose pour le calcul du retrait des bétons un modèle dans l'EN 1992-1 (règles communes et appliquées aux bâtiments) et un autre modèle dans l'EN 1992-2, spécifique

aux bétons de hautes performances (règles appliquées aux ponts). Le modèle de l'EN 1992-2 est la reprise du modèle français du BPEL appliqué aux bétons de hautes performances [LER 96c].

Les deux modèles distinguent le retrait endogène du retrait de dessiccation, le retrait total étant la somme de ces deux composantes. Les évolutions de l'amplitude final de retrait total en fonction de la résistance en compression sont illustrées sur la figure 5. L'EN 1992-1 propose 3 valeurs de retrait en fonction du choix de la classe de montée en résistance du ciment, à savoir les classes S, N ou R (S : slow, N : normal, R : rapid). L'amplitude augmente lorsque le ciment passe de la classe S à N puis de N à R. Nous avons retenu dans les simulations les classes N et R, les valeurs de retrait pour les ciments de classe S étant jugées trop faibles. On obtient ainsi des bornes inférieure et supérieure du retrait total. Les prévisions de l'EN 1992-2 sont au-dessus de la borne supérieure du modèle standard jusqu'à la résistance moyenne de 70 MPa. Au-delà, les prévisions du modèle BHP se situent entre les 2 bornes du modèle standard.

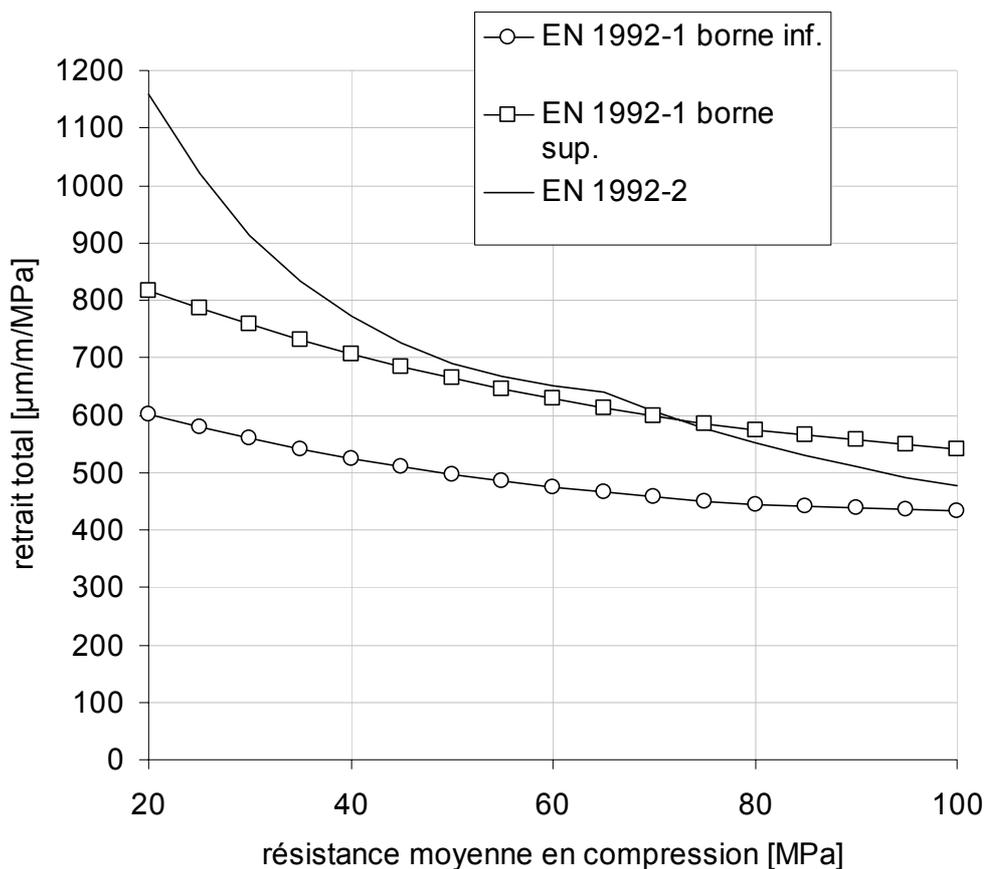


Figure 5 : évolution théorique selon les modèles du retrait total à long terme en fonction de la résistance pour une humidité relative extérieure de 50% et un rayon moyen de 80 mm.

2.2 Retrait endogène

Il est connu que l'amplitude du retrait endogène augmente avec la résistance des bétons [BAR 00, AIT 98, LER 96a]. De plus, il est admis que la cinétique de retrait endogène est une fonction de l'évolution temporelle de la résistance. Ainsi, les bétons de hautes résistances développent en général au jeune âge et à long terme un retrait endogène beaucoup plus important que les bétons de résistance ordinaire. Les modèles de l'EN 1992 prennent en compte ces différences (cf. figure 6). Cependant les données expérimentales sont très dispersées, et notamment, les mesures de certains bétons de classe ordinaire de résistance sont très élevées. Il est raisonnable de distinguer, sur la figure 6, 2 groupes de points : ceux correctement prédits par les 2 modèles, dont les bétons de hautes résistances font partie, et ceux dont le retrait est 60 à 100 % plus élevé que les prévisions. On retrouve dans la seconde catégorie l'ensemble des laboratoires, ce qui permet d'écarter raisonnablement l'argument d'erreurs expérimentales, la probabilité d'erreurs expérimentales dans 3 laboratoires différents étant peu probable. Toutefois cette conclusion est relativisée par les résultats de la figure 7 montrant des valeurs de retrait de bétons vibrés aussi importantes que celles des BAP du même laboratoire et pour la même campagne.

Les données correspondant aux valeurs élevées de retrait ne correspondent pas aux faibles valeurs de concentration granulaire, ce qui pourtant aurait constitué une explication satisfaisante.

Les modèles de l'EC2 sous-estiment donc sensiblement le retrait endogène de certains BAP. Des mesures de retrait sont à préconiser dans le cas de structures sensibles au retrait endogène, c'est-à-dire au retrait au jeune âge du béton.

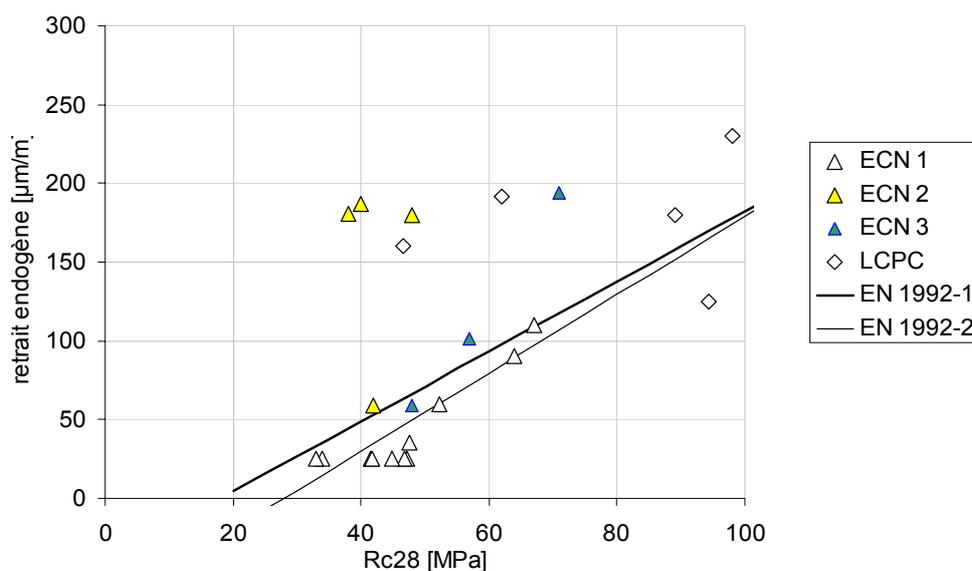


Figure 6 : évolution du retrait endogène de BAP en fonction de la résistance moyenne en compression.

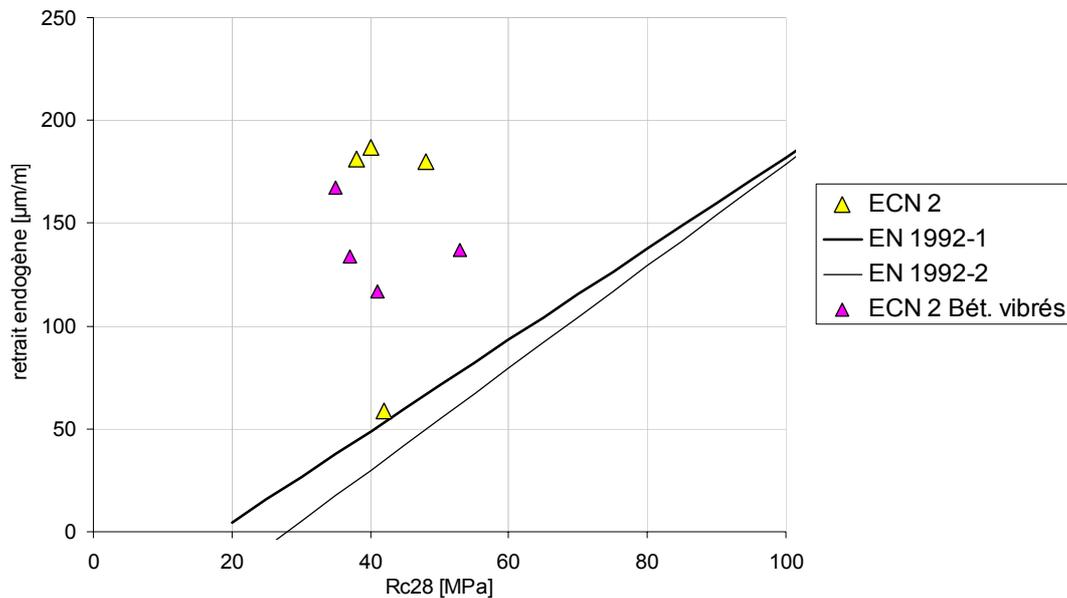


Figure 7 : comparaison entre BAP et bétons vibrés de la même campagne

2.3 Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est un phénomène dépendant de l'humidité relative extérieure. Le phénomène est de plus fonction de la cinétique de séchage et sera donc d'autant plus lent que le rayon moyen de la structure est important. Nous avons comparé les données disponibles en les regroupant par laboratoire. Les comparaisons des valeurs avec les modèles de l'EC2 sont données sur les figures 8, 9 et 10. Les courbes de l'EN 1992-1 sont calculées pour les ciments N et R. La courbe de l'EN 1992-2 comporte un point anguleux pour la résistance moyenne de 63 MPa, ce qui correspond à un raccordement de deux fonctions donnant l'amplitude de part et d'autre de cette résistance.

La précision des modèles est jugée assez satisfaisante pour les données du LCPC et du LMDC. Les données sont néanmoins plus proches de la borne supérieure de l'EN 1992-1. Les données de l'ECN sont plus dispersées et plutôt situées du côté de la borne inférieure de l'EN 1992-1. Ces dernières valeurs sont jugées faibles par rapport à celles communément admises à long terme pour un rayon moyen de 35 mm. Cependant, l'effet de fissuration de peau aux premiers âges du séchage a un effet de réduction du retrait par annulation des contraintes de peau. Cet effet est d'autant plus marqué que la taille de l'éprouvette est faible. C'est du moins l'explication qui peut être avancée pour les données de la figure 9.

En conclusion, on recommande, pour la prévision du retrait de dessiccation des BAP, d'utiliser la borne supérieure de retrait de dessiccation de l'EN 1992-1 ou la loi de l'EN 1992-2.

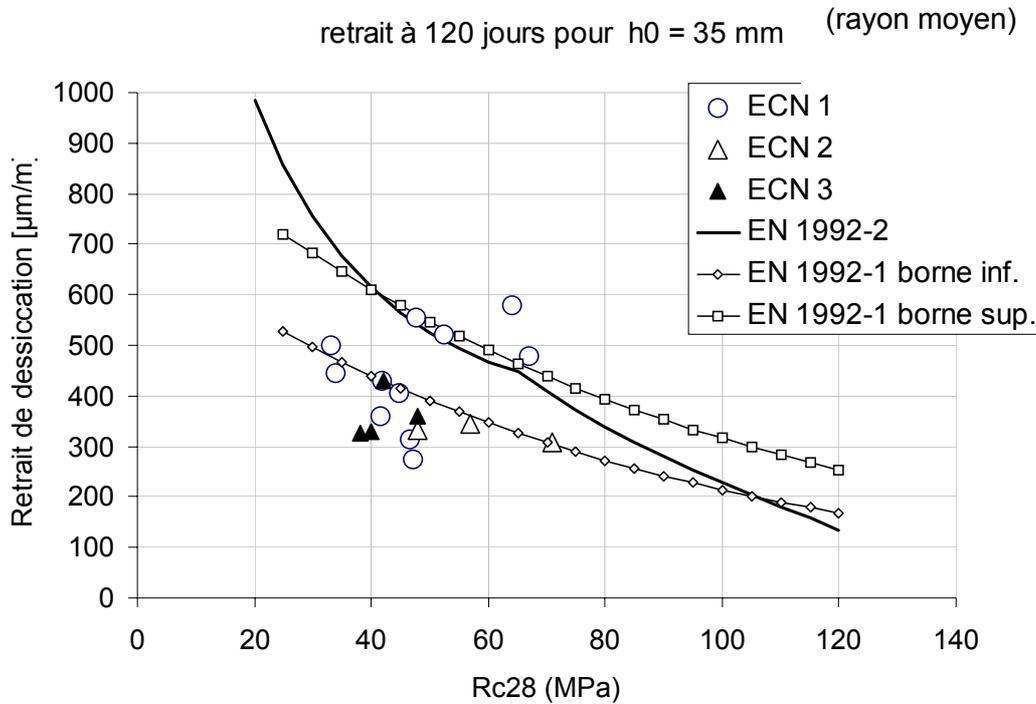


Figure 8 : évolution du retrait de dessiccation en fonction de la résistance en compression. Données de l'ECN (Ecole Centrale de Nantes).

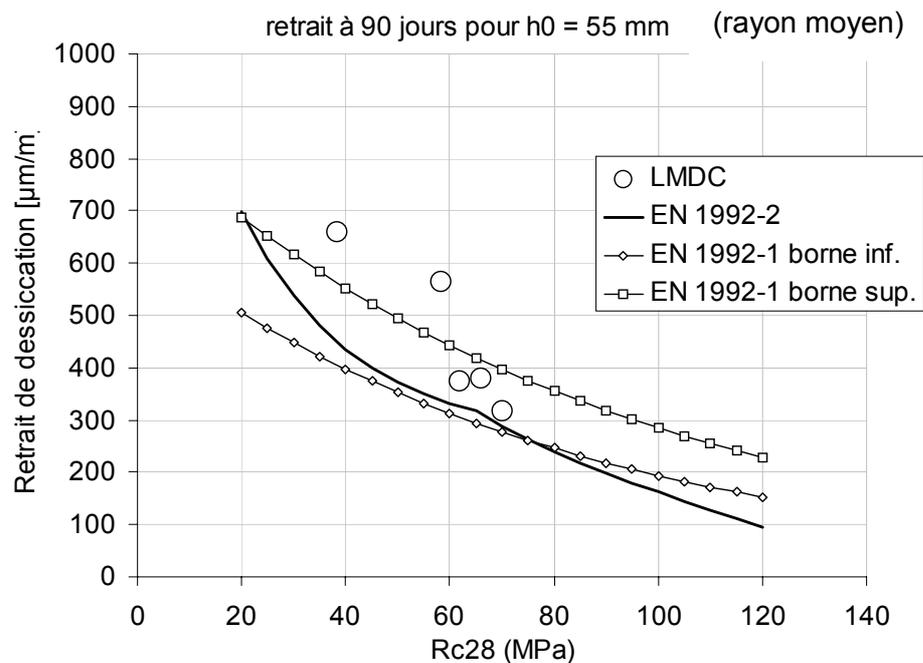


Figure 9 : évolution du retrait de dessiccation en fonction de la résistance en compression. Données du LMDC (INSA de Toulouse).

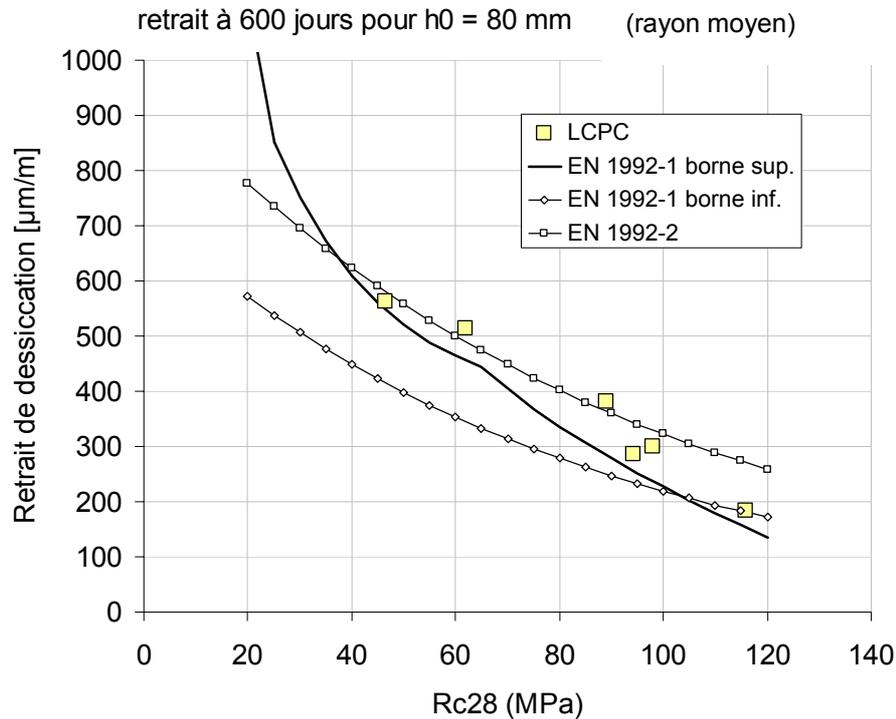


Figure 10 : évolution du retrait de dessiccation en fonction de la résistance en compression. Données du LCPC

2.4 Retrait total

On s'intéresse maintenant à la prévision du retrait total (somme des retraits endogène et de dessiccation) des BAP en séparant toujours les données par laboratoire pour les mêmes raisons que ci-dessus. Sur les 3 figures suivantes, les courbes de l'EN 1992-1 et 1992-2 sont tracées. Les données du LMDC (cf. figure 11) sont obtenues après 3 mois de séchage, ce qui représente une échéance assez brève. La figure 9 nous informe que l'écart est explicable par l'imprécision sur le retrait endogène puisque le retrait de dessiccation est bien prévu.

Les données de l'ECN (cf. figure 12) sont obtenues à 120 jours pour un rayon moyen de 35 mm (éprouvettes 7*7*28). Les données sont très dispersées et certains points sont à l'extérieur du fuseau de retrait. Une explication a été avancée plus haut concernant la sensibilité des éprouvettes de petites tailles aux effets du séchage au jeune âge, ce qui a pu générer une dispersion en raison de la différence de cinétique de montée en résistance des différents bétons.

Enfin les données du LCPC (cf. figure 13) sont obtenues après 600 jours de mesures ou, pour deux des bétons, à 200 jours suivie d'une extrapolation à 600 jours par la cinétique de la loi de l'EN 1992-2 (soit une augmentation comprise entre 15 et 25 % du retrait à 200 jours pour trouver celui à 600 jours). La dispersion est moins importante dans le cas présent. Les valeurs sont proches de la borne supérieure de retrait.

En conclusion, la prévision du retrait total des BHP est assez satisfaisante pour les deux modèles de l'EC2, alors que celle des bétons ordinaires est sous-estimée. Pour le calcul de l'amplitude finale, l'usage de la borne supérieure du modèle de l'EN 1992-2 est acceptable pour les BAP de résistance ordinaire et celui de l'EN 1992-2 pour les BHP. L'évolution des déformations de retrait total peut toutefois être mal prédite à cause d'une sous-estimation possible du retrait endogène. Pour les structures sensibles à cette composante, il est recommandé de réaliser des mesures.

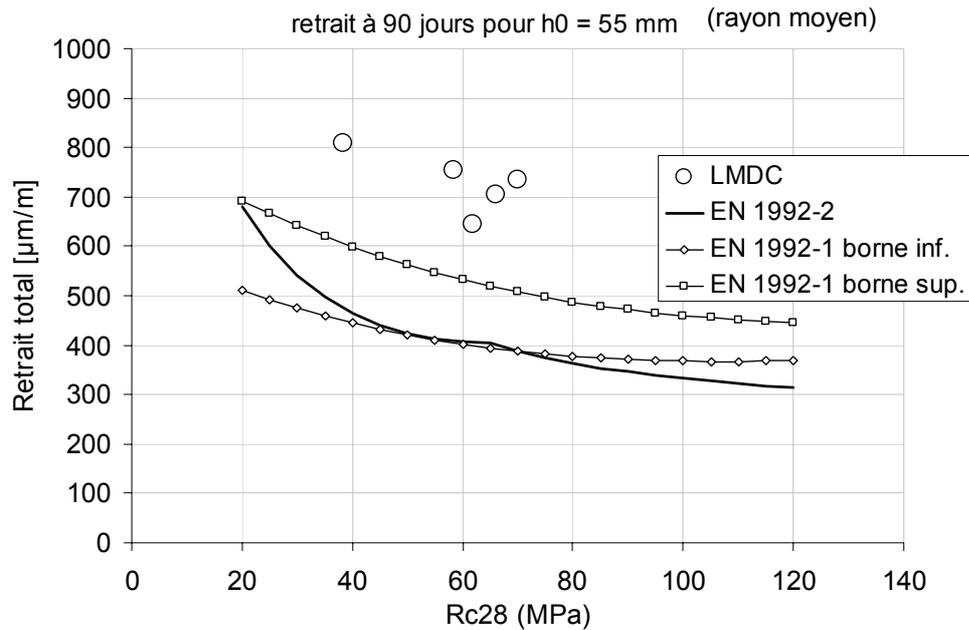


Figure 11 : évolution du retrait total en fonction de la résistance en compression.
Données du LMDC.

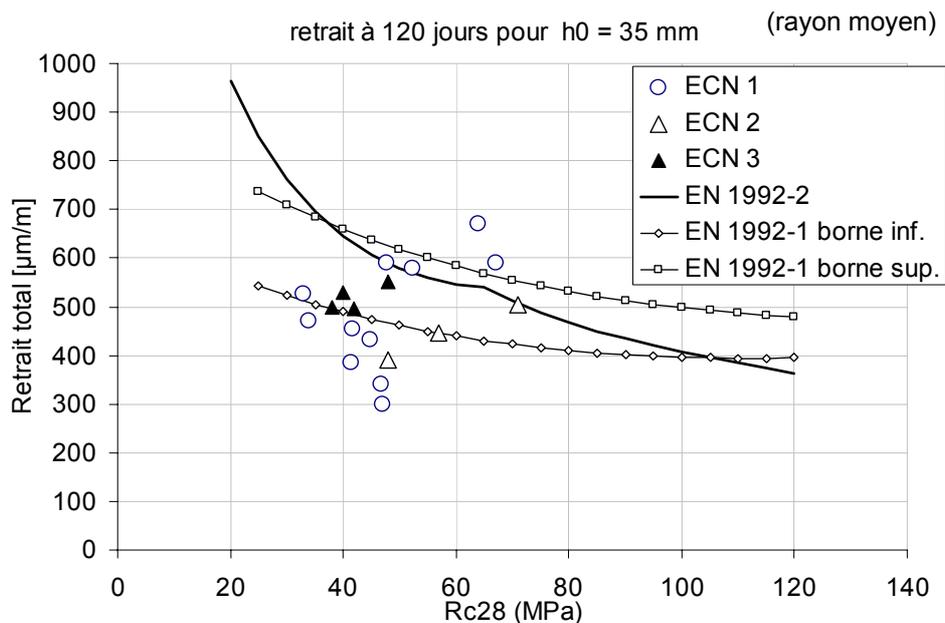


Figure 12 : évolution du retrait total en fonction de la résistance en compression.
Données de l'ECN.

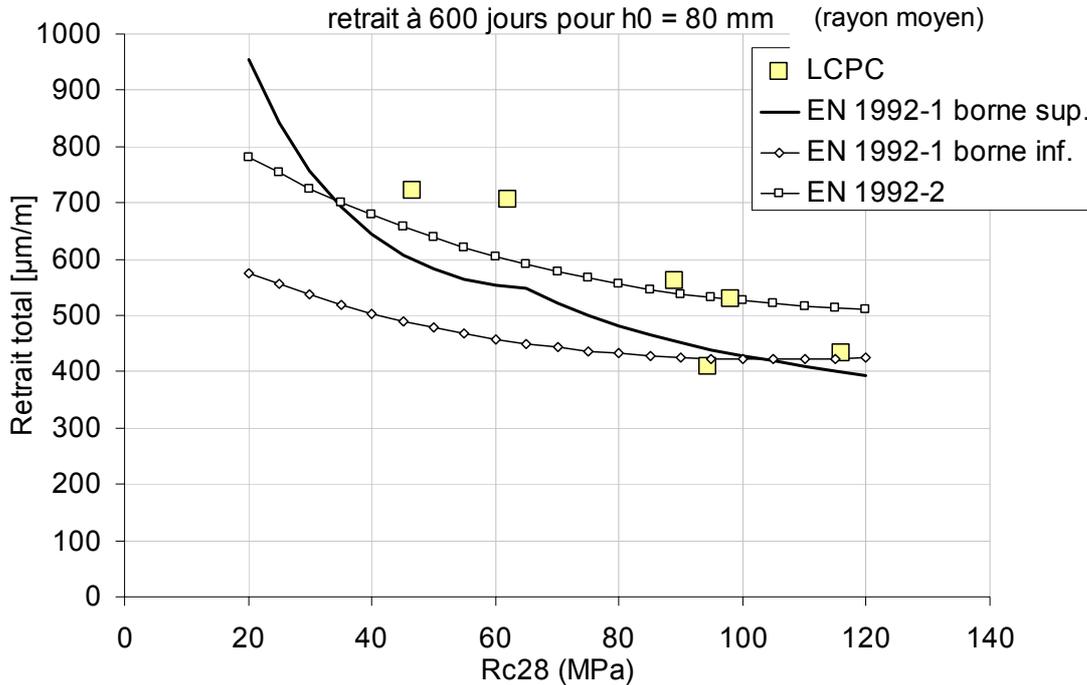


Figure 13 : évolution du retrait total en fonction de la résistance en compression.
Données du LCPC.

3. Fluage des BAP

Les résultats d'essais de fluage sur des formulations de BAP (obtenus dans le cadre du PN B@P et d'autres études) ont été analysés et comparés aux modèles de l'EC2. Pour plus de détails, on se référera au rapport du PN B@P « Recommandations pour le calcul du retrait et du fluage des BAP » [LER 07].

Il en ressort que les modèles de l'EC2 ont tendance à sous-évaluer les déformations de fluage des BAP. Dans le cas d'une évaluation dont l'erreur ne compromet pas le bon fonctionnement de l'ouvrage, il est possible d'appliquer le modèle de l'EN 1992-1, mais en introduisant le module sécant et non tangent dans la loi de fluage. En présence de structures sensibles au fluage, et notamment celles en BHP, l'usage de l'annexe B de l'EN 1992-2 est possible à la condition de réaliser une correction conforme à la méthode développée le paragraphe B104 "procédure d'identification expérimentale" de l'EN 1992-2. Cette correction est réalisée à partir d'essais de fluage.

4. Conclusion

Les bétons auto-plaçants peuvent développer des déformations légèrement plus importantes que les bétons vibrés, essentiellement en raison d'un volume de pâte plus important.

La loi de module peut être utilisée telle quelle dans les cas courant. Mais à l'instar de son utilisation pour les bétons vibrés, il convient de déterminer le module de manière

explicite si la structure est considérée comme sensible aux écarts éventuels par rapport à ces valeurs générales.

Les lois de retrait endogène de l'EN 1992-1 et de l'EN1992-2 sous-estiment, parfois de manière importante, le retrait endogène des BAP. Pour les structures sensibles à cette composante, il est recommandé d'effectuer des mesures afin d'ajuster la loi.

Les modèles de retrait de dessiccation prévus par l' EN 1999-1 (borne supérieure, i.e. ciment de catégorie R) et par l'EN 1992-2 ont une précision permettant leur usage dans les cas courants.

L'amplitude du retrait total est affectée par l'imprécision sur le retrait endogène mais, pour les structures courantes, il est admis de pouvoir utiliser les lois de l'EN 1992-1 ou EN 1992-2.

La loi de fluage de l'EN 1992-1 est plus précise que celle de l'EN1992-2, notamment pour les bétons auto-plaçants de haute résistance. Il est admis de pouvoir utiliser cette loi pour les cas de structures courantes non sensibles aux variations de fluage.

Dans le cas des structures pour lesquelles la prise en compte des déformations différées est particulièrement importante, il est recommandé pour les BAP dont la proportion de granulats est inférieure à 66 % :

- d'ajuster la loi de l'EN 1992-2, à partir d'essais de fluage conformément à la méthode décrite dans cette norme ;
- ou d'utiliser les règles données dans les avis techniques de certains éléments préfabriqués.

Bibliographie

[AIT 98] AITCIN P.C. (1998), "Autogenous shrinkage measurements", compte rendu de l'atelier international sur le retrait endogène du béton "Autoshrink 98", édité par Eiichi Tazawa, Hiroshima, E&FN SPON, pp. 246-256.

[BAR 00] V. BAROGHEL BOUNY, A. KHERBEK, (2000) "Effect of mix parameters on autogenous deformations of cement pastes - Microstructural interpretations", proceedings of the International workshop "shrinkage of concrete - shrinkage 2000", Paris, RILEM Ed.

[CUS 05] F. CUSSIGH, "Fluage du béton du viaduc de Rion Antirion", rapport interne.

[DEH 05] S. DEHAUDT, S. LEBOURGEOIS, P. ROUGEAU (2005), "Interest of high-performance self compacting concrete for precast concrete products", symposium international sur les bétons auto-plaçants, Chicago.

[DEL 00] F. DE LARRARD (2000), "Structures granulaires et formulation des bétons", études et recherches des LPC, OA 34, LCPC, Paris, p. 414

[DEL 00] F. DE LARRARD, "Structures granulaires et formulation des bétons", ERLPC OA 34, LCPC, Paris.

[DEL 92] F. DE LARRARD, R. LE ROY (1992), "Un modèle géométrique d'homogénéisation pour les composites bi-phasiques à inclusion granulaire de large étendue", comptes rendus de l'Académie des Sciences, t.314, série II, pp. 1253-1257.

[DEL 99] F. DE LARRARD (1999), "Concrete mixture proportioning, a scientific approach", E et FN SPON, Londres.

[LER 96a] LE ROY R. (1996), "Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances", Etudes et Recherches OA 22, LCPC Paris, p. 377

[LER 96b] R. LE ROY, D. DUVAL, F. DE LARRARD (1996), "Grand Viaduc de Millau - Essais de retrait et de fluage sur les 2 BHP", rapport d'étude pour l'AIOA, octobre.

[LER 96c] R. LE ROY, F. DE LARRARD, G. PONS (1996), "Calcul des déformations instantanées et différées des BHP", Bulletin des LPC, Spécial XIX, pp. 63-84, mai 1996.

[LER 07] LE ROY R. (2007), "Recommandations pour le calcul du retrait et du fluage des BAP", Rapport du Projet National B@P, ENPC-LAMI, janvier.

[LOU 06] A.LOUKILI (2006), "Etude du retrait plastique, du retrait endogène et du retrait de dessiccation des BAP au très jeune âge", Rapport du Projet National B@P, Ecole Centrale de Nantes, décembre.

[ROZ 04] E. ROZIERE, A. LOUKILI, PH. TURCRY, "Influence du volume de pâte sur le retrait et fissuration des bétons auto-plaçantss", Rapport du Projet National B@P, Ecole Centrale de Nantes, 40 pages, décembre.

[PON 02] G. PONS, E. PROUST (2002), "Retrait et fluage des BAP, axe 4-2 retrait et fluage", rapport pour le PN BAP.

[POP 05] A. M. POPPE, G.D. SCHUTTER (2005), "Cement hydration in the presence of high filler contents", Cement and Concrete Research, 35, pp. 2290-2299.

[SED 00] T. SEDRAN, "Self-compacting concrete", report for task 4 for LCPC, projet européen SCC.

[STA 05] S. STAQUET, L. LAUVIN, J.C. RENAUD, S. DUBROCA, F. TOUTLEMONDE (2005), "Expérimentation sur poutres préfléchies à talon BTHP", rapport pour le Projet National MIKTI.

[STA 06] S. STAQUET, F. TOUTLEMONDE (2006), "Innovation pour les ouvrages ferroviaires en France : une poutre mixte préfléchiée en BTHP, Innovation for the railway bridge decks in France : a precambered composite beam in VHPC", The French Technology of Concrete, Ouvrage spécial pour le 2ème congrès de la FIB, Naples, juin 2006.

[TUR 04] PH. TURCRY, "Retrait et fissuration des bétons auto-plaçantss - Influence de la formulation", Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, février.

[WAL 98] WALLER V. (1998), "Relations entre composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression", Doctorat de l'ENPC, spécialité Structures et Matériaux, Paris.

ANNEXE G : DURABILITÉ DES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS

1. Préambule

La durabilité des bétons est l'aptitude du matériau à résister aux mécanismes de détériorations auxquels il peut être exposé. Une structure en béton doit conserver sa résistance et continuer à remplir sa fonction structurelle tout au long de sa durée de vie utile et spécifiée. Les agressions physiques ou chimiques peuvent être d'origine interne ou externe.

La durabilité d'un béton auto-plaçant vis-à-vis des agressions externes et internes est régie par des mécanismes similaires à ceux connus pour les béton ordinaires.

Le texte suivant est un rappel des différents mécanismes d'altération des bétons et une analyse de l'incidence potentielle du caractère auto-plaçant du béton sur sa durabilité.

2. Durabilité des bétons auto-plaçants : application des textes en vigueur

2.1 Alkali réaction

Le schéma décisionnel de qualification des granulats vis-à-vis de l'alkali réaction est indépendant du caractère auto-plaçant ou non des bétons dans lesquels les granulats seront utilisés.

Par ailleurs, le test de performance béton est applicable pour tous les bétons indépendamment de leur rhéologie. La seule précision à apporter concerne le bilan en alcalins actifs des formulations. En effet, les bétons auto-plaçants peuvent renfermer des agents de cohésion qui ne sont pas normalisés à ce jour. Les alcalins totaux des adjuvants "classiques" des bétons ordinaires sont comptabilisés en tant qu'alcalins actifs. Sans connaissance précise de ce type de produits, il faudrait intégrer les alcalins totaux des agents de cohésion.

2.2 Corrosion des armatures : pénétration des ions chlorure et carbonatation

Les seuils en chlorure et les épaisseurs d'enrobage définis par les normes pour un environnement donné n'ont pas de raison d'être modifiés. Le béton auto-plaçant est formulé à partir des mêmes constituants que les bétons ordinaires (ciment, additions, granulats et adjuvants). La présence éventuelle d'agents de cohésion exempts de chlorure n'a pas d'influence directe sur les processus de pénétration des chlorures. Il en est de même pour le gaz carbonique.

Les bétons auto-plaçants ont un volume de pâte plus important que les bétons ordinaires et une rhéologie spécifique différente des bétons fluides classiques. La différence peut concerner la porosité interconnectée des bétons auto-plaçants en

raison du volume de pâte plus important. Toutefois, des études effectuées au CEBTP et au LERM sur l'influence du mode de cure sur la durabilité des bétons auto-plaçants a montré que les coefficients de diffusion des ions chlorure des bétons auto-plaçants sont du même ordre de grandeur que les coefficients des bétons ordinaires de même rapport E/liant équivalent (DCI- $\approx 10^{-11}$ m²/s pour des BAP 25/B 25 et 10^{-12} à $5 \cdot 10^{-13}$ m²/s pour des BAP 40/B 40).

Les cinétiques de carbonatation en conditions accélérées sont similaires.

2.3 Réactions sulfatiques

Attaques sulfatiques exogènes

La durabilité des bétons ordinaires vis-à-vis d'attaques sulfatiques exogènes est régie par le choix du liant (PM ES ou ciment avec additions de type laitier de haut fourneau, cendres volantes ou fumées de silice : barrière chimique) et la porosité du béton (barrière physique) liée au rapport E/ Liant équivalent. Il en est de même pour le béton auto-plaçant.

Réaction sulfatique interne

Les facteurs concomitants nécessaires à la formation de l'ettringite différée dans les bétons ordinaires sont les suivants :

1. L'échauffement caractérisé par la température ($> 65^{\circ}\text{C}$) et la durée du palier
2. La teneur en alcalins
3. La teneur en sulfates
4. La teneur en aluminat tricalcique
5. L'humidité relative élevée et dans une moindre mesure,
6. La nature des granulats

Ces facteurs sont valables aussi bien pour un béton auto-plaçant que pour un béton traditionnel. La présence d'adjuvants spécifiques aux bétons auto-plaçants ne joue pas un rôle direct dans ce processus.

2.4 Agressions chimiques

Comme pour les propriétés de transfert vis-à-vis du gaz carbonique et la pénétration des ions chlorure, la résistance des bétons auto-plaçants aux agressions chimiques diverses (telles que : milieux acides aqueux ou gaz, sels d'acides faibles, etc) est contrôlée par la nature du liant (ciments composés) et la porosité interconnectée du béton liée au rapport E/Liant équivalent.

3. Conclusion

De façon générale, la résistance des bétons auto-plaçants vis-à-vis des mécanismes d'agressions externes et internes peut être appréhendée par les textes normatifs actuels, notamment le fascicule de documentation NF P18-011 et la norme NF EN 206-1 et les normes des produits préfabriqués.

ANNEXE H : AIDE A LA RÉDACTION DE CAHIER DES CHARGES TECHNIQUES POUR LES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS (BAP)

AVANT-PROPOS

Le présent document d'aide à la rédaction de CCTP a pour objet de proposer au prescripteur des spécifications particulières sur des problématiques propres au BAP sous forme de clauses techniques pouvant être insérées dans un cahier des charges.

Ces clauses techniques, sauf expressément indiqué dans le présent document, peuvent s'inscrire en complément des textes normatifs ou réglementaires en vigueur (NF EN 206-1, DTU 21 et Fascicule 65 A, normes de produits préfabriqués dont la norme NF EN 13369).

Il est précisé que le document a été rédigé principalement dans l'optique de béton coulé en place. Dans le cas de la préfabrication en usine, des dispositions différentes peuvent être adoptées sous réserve de vérification de conformité du produit fini. Pour les bétons préfabriqués et en fonction des matériaux utilisés ainsi que des process de fabrication, les modes opératoires d'essais sur le BAP à l'état frais ainsi que les recommandations pour la fourchette d'étalement à la réception (annexe H1) peuvent bien entendu être utilisés quand nécessaire.

Pour ce qui est de la présentation, les parties explicatives sont en caractères droits et les propositions de clauses sont données en italique.

1. Définitions et classification

Les définitions et la classification des BAP sont données dans les recommandations de l'AFGC.

2. Constituants

2.1 Granulats

La sensibilité des BAP au dosage en fines et à la courbe granulométrique globale est plus importante que pour les bétons ordinaires vibrés.

Pour l'étendue de finesse des sables, les granulats doivent répondre à l'exigence des codes A ou B selon la norme XP P 18-545.

Par ailleurs, le maintien rhéologique dans le temps est primordial, notamment pour les BAP coulés in-situ.

Pour les BAP qui ne sont pas fabriqués sur le lieu de mise en oeuvre, l'absorption d'eau des granulats est limitée à 2,5 % (code A) sauf s'il est démontré que le maintien

rhéologique du BAP reste satisfaisant dans les conditions réelles de transport (pompage éventuel) et de mise en œuvre.

2.2 Agents de cohésion

Certaines compositions de BAP peuvent contenir des agents de cohésion, appelés aussi agents de viscosité.

Ces produits, minéraux ou organiques, ont pour but de diminuer la sensibilité du béton frais vis-à-vis du ressuage et de la ségrégation, augmentant ainsi la robustesse de la formule de béton.

Il n'existe pas à ce jour de norme Produits pour ce type d'adjuvant, la catégorie "rétenteur d'eau" de l'EN 934-2 s'en rapprochant mais étant plus ciblée sur le ressuage.

Les agents de cohésion proposés doivent satisfaire à l'un des deux cas suivants :

Cas 1 :

L'agent est un adjuvant rétenteur d'eau conforme aux stipulations techniques selon la norme NF EN 934-2.

Cas 2 :

L'agent est considéré comme un ajout au sens des paragraphes NA 3.1.47 et NA 5.1.7 de la norme NF EN 206-1. Conformément à la norme NF EN 206-1, il conviendra alors de vérifier l'effet lié à l'adjonction de l'agent de cohésion par l'intermédiaire d'un essai préliminaire. Il peut être réalisé directement sur la formule de béton considérée (conformité au cahier des charges) ou bien se référer à des essais réalisés sur un béton ou un mortier de référence. Dans ce dernier cas, les essais auront été effectués avec le dosage usuel et le dosage maximal recommandé (pour les applications BAP) déclarés par le fournisseur. Ces essais comparatifs concernent les exigences correspondant à la catégorie "rétenteur d'eau" de la norme NF EN 934.2 à l'exception du ressuage, les résultats devant être conformes aux prescriptions de la norme .

De plus, et conformément à l'article 4 de l'EN 934-2, l'agent de cohésion ne doit pas modifier de façon significative le retrait du béton durci. Ceci peut être mesuré en utilisant par exemple la méthode de détermination de stabilité dimensionnelle décrite dans l'ASTM C494, sur un mortier de référence conforme à l'EN 480-1. La comparaison s'effectue alors entre un mortier de référence suffisamment fluide et le même mortier (avec le même dosage en eau) de fluidité éventuellement amoindrie incorporant l'agent de cohésion. La différence de retrait ne doit pas excéder 35 % si le mortier de référence présente un retrait de plus de 0,3 mm/m et ne doit pas excéder 0,1 mm/m dans le cas contraire.

3. Formulation

3.1 Généralités

La sensibilité des propriétés des BAP à l'état frais aux écarts de composition est plus importante que pour des bétons ordinaires. Un soin particulier est à apporter sur la formulation pour évaluer les écarts de propriétés notamment rhéologiques en fonction d'écarts de composition et en particulier d'écarts de teneur en eau.

Il est recommandé au prescripteur de prévoir une clause permettant de déterminer la fourchette d'étalement à la réception dans laquelle le BAP conserve toutes les propriétés requises (voir annexe H1).

L'influence de la température sur la rhéologie des BAP pourra conduire à adapter les dosages en adjuvants suivant les saisons.

Dans le cas des bétons coulés en place, le formulateur de béton doit déterminer une durée pratique d'utilisation du béton, notée T_m , pendant laquelle le béton doit respecter les critères propres à sa catégorie. Cette durée peut varier en fonction de différents paramètres et notamment l'évolution de la température du béton frais. Le formulateur doit vérifier quels paramètres sont importants et définir T_m dans chacune des configurations possibles. T_m sera notamment défini en fonction de la température maximale du béton frais lors de la fabrication et du transport.

3.2 Exemples de clauses techniques utilisables

Sauf expérience différente probante, le prescripteur pourra utiliser les clauses suivantes.

Les propriétés requises pour le BAP, en fonction de la catégorie, sont données ci-après :

	Cat. 1	Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 3a	Cat. 3b
Valeur maximale au tamis ⁽¹⁾	20 %	20 %	15 %	15 %	10 %
Valeur minimale à la boîte en L	Pas de prescription particulière	0.80 avec 2 barres	0.80 avec 2 barres	0.80 avec 3 barres	0.80 avec 3 barres

(1) : La valeur limite autorisée au tamis ne peut en aucun cas être supérieure à 30 %, elle peut être supérieure à la valeur spécifiée dans le tableau si l'on dispose de mesures probantes de non-ségrégation pour des applications similaires (voir annexe E des Recommandations AFGC). Il ne doit pas y avoir de signe de ressuage lors de l'essai.

Les seuils du tableau correspondent aux valeurs à respecter au stade de la qualification de la formulation. Ils sont à respecter pendant toute la durée pratique d'utilisation T_m .

Dans le cas des éléments préfabriqués, pour lesquels des vérifications de conformité du produit fini sont prévues dans le cadre de la norme produit et le cas échéant du référentiel de certification, deux options sont possibles pour valider la formulation :

- Option 1 : le BAP répond aux critères du tableau précédent.
- Option 2 : le BAP déroge aux critères du tableau précédent ; l'absence de ségrégation (dans le domaine de la FEF) est alors vérifiée sur le produit fini à partir d'essais spécifiques (voir annexe E des recommandations AFGC).

Les contrôles de réception ou avant mise en œuvre du béton sont essentiellement basés sur l'essai d'étalement.

La valeur cible d'étalement est définie suite à l'essai de qualification (cf. dossier technique décrit ci-après) ainsi que les variations admissibles (voir annexe H2). Cette valeur cible est généralement comprise entre 600 mm et 750 mm.

La fourchette d'étalement à la réception peut être définie sur la base de la valeur cible (avec une tolérance de plus ou moins 50 mm) ou bien par désignation d'une classe d'étalement selon le tableau suivant :

Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement.

Lors de bétonnage en grande hauteur, une attention particulière est à porter sur la stabilité du béton vis-à-vis du ressuage, lequel peut nuire à l'homogénéité du béton et à la qualité du parement.

La formulation du béton est validée par un dossier technique qui consiste en un ensemble de résultats d'essais permettant de justifier que le béton auto-plaçant est conforme aux propriétés requises dans toute la fourchette d'étalement à la réception FER proposée (ou à la mise en œuvre dans le cas de produits de structure préfabriqués en usine) et pendant toute la durée pratique d'utilisation T_m . Ces résultats peuvent provenir soit d'essais de laboratoire soit de fabrication en centrale à l'occasion de chantier(s) précédent(s) ou d'essais de mise au point de formule. La matérialisation des résultats pourra être réalisée par une fiche technique de BAP (cf. exemple en annexe H2) comprenant les indications permettant de vérifier la conformité aux valeurs limites du tableau ci-dessus. Les essais de laboratoire doivent être validés par des essais en centrale.

Dans le cas d'une prescription de béton relevant du Fascicule 65A et lorsqu'une étude est nécessaire, les plages de vérification de la sensibilité de la formule sont à adapter

en fonction de la robustesse de la formulation et de la précision des matériels de fabrication Un programme détaillé d'études est donné en annexe H3.

Dans le cas de convenances réalisées dans le cadre du Fascicule 65A, des essais de rhéologie seront à réaliser (étalement, essais au tamis et boîte en L s'il y a lieu). Dans ce cas, une adaptation du dosage de l'étude en plastifiant ou superplastifiant dans la fourchette $\pm 20\%$ est tolérable pour s'adapter aux conditions réelles de malaxage.

4. Réalisation des éprouvettes de résistance à la compression

Les éprouvettes de résistance à la compression doivent être réalisées sans apport énergétique au béton pour sa mise en place.

Les dispositions du fascicule de documentation FD P18-457 spécifiques aux BAP s'appliquent.

5. Commande

5.1 Cas du béton prêt à l'emploi

Lors de la commande d'un BAP prêt à l'emploi, le béton doit être spécifié conformément à la norme NF EN 206-1.

La catégorie de BAP doit être indiquée lors de la spécification.

5.2 Cas d'un produit préfabriqué en usine

Pour les produits préfabriqués en usine et comme il s'agit de produits finis, la commande est réalisée en faisant référence à l'édition nationale de la norme de produit et, lorsqu'il n'y a pas de norme de produit, à la norme NF EN 13369.

Pour les produits structuraux, le fournisseur doit pouvoir indiquer la catégorie de BAP utilisée lorsque le BAP répond aux critères du tableau du paragraphe 3.2 (option 1), ou l'étalement lorsque l'absence de ségrégation est vérifiée sur produit fini (option 2).

Selon le cas, la norme de produit ou la norme NF EN 13369 spécifie systématiquement les normes support concernées, qu'il s'agisse, par exemple, des normes relatives aux constituants et au béton, ou bien des exigences relatives à la fabrication du produit ou enfin des prescriptions adéquates des Eurocodes. Les aspects réglementaires relatifs au Marquage CE sont automatiquement couverts.

6. Fabrication et transport

La fabrication et le transport des BAP doivent être conformes à la norme NF EN 206-1 dans le cas des bétons coulés en place ; aux normes de produits dont la norme NF EN 13369 pour les éléments préfabriqués.

Le producteur définit une FEF qui tient compte du délai entre la fabrication et la mise en œuvre (incluant le temps de transport éventuel entre le site de production et le chantier). La valeur cible de la FEF est généralement comprise entre 600 et 750 mm et peut être légèrement supérieure d'une part à la FER et d'autre part à la valeur cible obtenue lors de l'essai de qualification. Cette FEF est renseignée au niveau de la fiche signalétique (annexe H2).

Le producteur porte une attention particulière à la régularité de la fabrication et notamment la régularité de la teneur en eau. Une procédure spécifique pour ce type de béton doit être rédigée et utilisée par le producteur. Elle doit mentionner en particulier la fréquence de contrôle de l'étalement à la fabrication.

7. Contrôle de conformité de la rhéologie des BAP

7.1 Fréquence de contrôles

Le contrôle de conformité de la rhéologie des BAP est réalisé par des mesures d'étalement.

Pour le béton prêt à l'emploi, la fréquence des contrôles doit être au minimum d'une fois par journée de livraison (au démarrage de la production en particulier) sans être inférieure à la fréquence indiquée dans le tableau 13 de la norme NF EN 206-1.

Pour les produits préfabriqués en usine la fréquence de contrôle est définie dans les normes de produits, dont la norme NF EN 13369.

7.2 Critères de conformité

Dans le cas où la FER est définie comme une classe d'étalement, le béton est conforme si l'étalement à la réception est situé dans la FER augmentée de l'incertitude de l'essai prise conventionnellement égale à 20 mm. Le nombre de résultats individuels situés en dehors de la FER est limité conformément au tableau 19a de la norme NF EN 206-1.

Dans le cas où la FER est définie à partir d'une valeur cible, le béton est conforme si l'étalement à la réception est situé dans la FER.

D'autres contrôles que l'étalement peuvent être effectués, l'écart maximal admissible des résultats d'essais individuels par rapport aux limites des valeurs cibles de la catégorie est 2 % sur l'essai au tamis et 0,05 sur l'essai de la boîte en L. Le critère d'acceptation est celui du tableau 19a de la norme NF EN 206-1.

8. Réception

La réception du béton sur chantier doit permettre de vérifier d'une part l'aptitude du béton à être mis en œuvre sans aucune vibration et d'autre part sa conformité à la formule nominale. Cette réception consiste en des inspections visuelles et des mesures de l'étalement. Le critère de réception est celui donné au §7.2.

Lors de la livraison, il est recommandé d'effectuer un brassage du béton à grande vitesse pendant une minute au moins avant début du déchargement.

Il sera réalisé une inspection visuelle à chaque charge livrée et une mesure d'étalement au minimum sur la première charge de la journée de bétonnage et systématiquement en cas de doute.

Dans le cas où seraient livrés sur chantier des bétons auto-plaçants en même temps que des bétons ordinaires, une procédure de distinction des deux types de béton est à définir.

Dans le cas de béton fabriqué par une centrale de chantier, les règles du chapitre 7 s'appliquent avec une FEF généralement confondue avec la FER.

9. Mise en œuvre

Avant de procéder aux premières opérations de bétonnage, et notamment lorsque I est inférieur à 60 mm, le prescripteur peut demander (après l'avoir prévu au Marché) la réalisation d'un élément témoin dans les conditions de l'ouvrage à réaliser (pompage, ferrailage, coffrage, etc.) afin de s'assurer que les exigences attendues soient respectées.

Quelle que soit la méthode retenue pour mettre en place le béton frais et en l'absence de références probantes au-delà de cette valeur, il convient de limiter à une longueur maximale de 10 m le cheminement horizontal dans les coffrages.

De même la hauteur de chute libre est limitée à 5 m.

Les exigences de cure du projet de norme prEN 13670-1 ou de la norme NF EN 13369 dans le cas des produits de structures préfabriqués sont à respecter. De plus, pour les applications horizontales, une cure par un produit ad hoc est fortement recommandée. Dans le cas de collage ultérieur d'un revêtement et si un produit de cure filmogène a été utilisé, ce produit de cure doit être enlevé conformément aux règles de l'art sauf étude particulière.

10. Annexes

H1 Définition de la fourchette d'étalement à la réception d'un BAP

H2 Caractéristiques du BAP à l'état frais : fiche technique

H3 Epreuve d'étude en laboratoire (adaptation Fascicule 65A)

ANNEXE H1 : DÉFINITION DE LA FOURCHETTE D'ÉTALEMENT À LA RÉCEPTION D'UN BAP

Une formule de BAP n'est utilisable que dans une fourchette d'étalement à la réception (FER) définie.

On note SFmin et SFmax (SF pour Slump Flow) les valeurs extrêmes définissant cette fourchette.

Celles-ci sont telles que :

- lorsque l'étalement vaut SFmin, les spécifications d'écoulement à la boîte en L sont encore respectées,
- lorsque l'étalement vaut SFmax, les spécifications touchant à la ségrégation (essai au tamis) sont encore respectées.

Pour vérifier ce point on procède lors de la phase de préparation de chantier à des essais sur la formule nominale avec des variations sur le dosage en eau permettant de faire varier l'étalement dans la fourchette à vérifier.

En général, l'écart conventionnel entre SFmin et SFmax est de 100 mm mais peut être adapté en fonction de la robustesse de la formule .

ANNEXE H2 : CARACTÉRISTIQUES DU BAP À L'ÉTAT FRAIS

FICHE TECHNIQUE

APPELLATION NORMALISÉE DU BÉTON						
RÉFÉRENCES D'EMPLOI	Nom du chantier					
	Fournisseur Béton					
	Volume de béton (m ³)					
	Période					
	Application	Verticale				<input type="checkbox"/>
		Horizontale				<input type="checkbox"/>
Catégorie	1	<input type="checkbox"/>	3a	<input type="checkbox"/>		
	2a	<input type="checkbox"/>	3b	<input type="checkbox"/>		
	2b	<input type="checkbox"/>				
Caractéristiques de la formule nominale**		T ₀	T ₃₀	T ₆₀	T _m [*]	
	Etalement (mm)					
	Taux de ségrégation (%) (essai au tamis)					
	Taux de remplissage (essai boîte en L)					
Caractéristiques de la formule dérivée haute**	Etalement (mm) (SF _{max})					
	Taux de ségrégation (%) (essai au tamis)					
Caractéristiques de la formule dérivée basse**	Etalement (mm) (SF _{min})					
	Taux de remplissage (essai boîte en L)					

	SF _{min}	SF _{max}
FEF***		
FER****		

- * *Préciser la durée pratique d'utilisation T_m =*

- ** *Préciser la température moyenne du béton lors de sa fabrication =*
- *** *FEF : fourchette d'étalement à la fabrication*
- **** *FER : fourchette d'étalement à la réception*

ANNEXE H3 : EPREUVE D'ETUDE EN LABORATOIRE

L'épreuve d'étude, exécutée en laboratoire, consiste à fabriquer une gâchée nominale et un ensemble de gâchées correspondant à des formules dérivées, destinées à évaluer la sensibilité de la formule aux variations de composition.

Chaque gâchée donne lieu à un prélèvement à partir duquel sont effectués :

- un essai de suivi d'étalement dans le temps (jusqu'à T_m),
- un essai de suivi de stabilité au tamis (à t_0 et t_{30}),
- un essai de suivi d'écoulement à la boîte en L (à t_0 et T_m),
- un essai de détermination de la résistance à la compression à 28 jours dont le résultat sera pris égal à la moyenne arithmétique des mesures effectuées sur 3 éprouvettes.

Les gâchées dérivées sont les suivantes :

- 2 gâchées dérivées sur la quantité d'eau [a priori $\pm X$ l/m³ par rapport à la formule nominale, mais cette valeur peut être augmentée si la formule le permet (X est défini par le producteur en fonction de ses moyens de fabrication tout en restant compris entre 5 et 10)],
- dans le cas de sable fillérisé à plus de 6 % de passant à 0,063 mm et lorsque l'étendue de la teneur en fines du sable est supérieure à 3, 2 gâchées dérivées correspondant à des variations de ± 25 kg/m³ de la fraction de liant (ciment + addition), au prorata des dosages respectifs en ciment et en addition, pour simuler les variations de teneur en fines.

L'épreuve d'étude est réputée probante si :

- pour la formule nominale et chacune des gâchées dérivées, les résultats de caractérisation sur béton frais (étalement, stabilité au tamis, boîte en L) sont satisfaisants sur toute la durée d'utilisation T_m ,
- pour le formule nominale, le résultat f_{cE} de l'essai de compression satisfait aux deux conditions suivantes :

$$\text{Condition 1 : } f_{cE} > f_{c28} + \lambda (CE - C_{\min})$$

$$\text{Condition 2 : } f_{cE} > f_{c28} + 2S$$

f_{c28} étant la résistance caractéristique spécifiée

C_{\min} la valeur minimale de la résistance à la compression à 28 jours pouvant être respectée pour le ciment choisi, observée pendant une durée significative au cours de l'autocontrôle du fournisseur

CE la résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé pour l'exécution de l'épreuve

λ un coefficient pris égal à 1, sauf justification probante

S l'écart-type prévisionnel de la distribution des résistances (pris au minimum égal à 3 MPa)

$$f_{cE} \geq f_{c28} + \lambda (CE - C_{min})$$

$$f_{cE} \geq f_{c28} + 25$$

f_{c28} étant la résistance caractéristique spécifiée

- pour les gâchées dérivées, les résultats des essais de résistance à la compression à 28 jours sont compris dans la fourchette $f_{cE} \pm 15 \% f_{cE}$.