

## Malaxage d'un béton fibré à ultra-hautes performances

**Bogdan CAZACLIU \***

*Laboratoire central  
des ponts et chaussées*

**Ahmed LOUKILI**

**Boualem ABDI**

*Institut de recherche en génie civil et mécanique (GeM),  
École centrale de Nantes*

**Robert LE ROY**

*Laboratoire analyse des matériaux et identification (LAMI),  
ENPC/LCPC*

### ■ RÉSUMÉ

L'évolution de la puissance de malaxage et des propriétés du béton frais (mini-cône, V-Funnell et maniabilimètre) et du béton durci (résistance en flexion et en compression, module élastique, masse volumique) a été étudiée pour différents protocoles de malaxage d'un béton fibré à ultra-hautes performances dans un malaxeur de laboratoire. L'analyse des mesures montre que le temps de malaxage est le paramètre dominant, mais que d'autres paramètres de fabrication influencent les propriétés mécaniques du béton produit. La prolongation du temps de malaxage en présence des fibres entraîne une augmentation de la teneur en air. L'introduction des fibres avant celle de la phase liquide génère une perte notable des propriétés mécaniques du béton. Une vitesse d'agitation trop grande ou trop petite conduit à des hétérogénéités. Un protocole de fabrication est enfin sélectionné parmi les variantes analysées.

### Mixing of an ultra high-performance fiber-reinforced concrete

#### ■ ABSTRACT

*The evolution in mixing power and in the properties of both fresh concrete (mini-cone, V-Funnell and workability meter) and hardened concrete (bending strength and compressive strength, elastic modulus, mass density) has been examined for various mixing protocols using an ultra high-performance fiber-reinforced concrete within a laboratory mixer. The analysis of measurements indicates that mixing time is the predominant parameter, yet other production parameters also influence the mechanical properties of the resultant concrete. Extending the mixing time in the presence of fibers causes an increase in air content. The introduction of fibers prior to the liquid phase engenders a significant loss in the sample's mechanical properties. An excessive or insufficient agitation speed leads to heterogeneities. A concrete fabrication protocol is ultimately selected from among the variants submitted for analysis.*

\* AUTEUR À CONTACTER :

**Bogdan CAZACLIU**  
bogdan.cazacliu@lcpc.fr

## INTRODUCTION

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) sont des composites cimentaires dont la formulation, complexe, vise à optimiser l'interaction des constituants au niveau mésoscopique, garante de propriétés rhéologiques extrêmement favorables par rapport aux bétons classiques [1]. On recherche à la fois des propriétés mécaniques (résistance, ductilité, durabilité) en limite supérieure de ce que les constituants permettent d'obtenir ainsi qu'une mise en œuvre facilitée par le caractère autoplaçant du béton frais. La mise en place d'un agencement méso-structurel efficace (dispersion et mouillage d'agglomérats d'éléments fins, distribution des fibres) nécessite un processus d'homogénéisation efficient sur un laps de temps qu'on souhaite généralement court. Pour ces produits, la phase de malaxage acquiert alors une importance capitale. Afin d'obtenir des carac-

téristiques mécaniques bien contrôlées, il semble indispensable d'analyser à la fois les séquences d'introduction des constituants et le système d'agitation en vue de réduire la durée du malaxage tout en assurant son efficacité.

La faible valeur ajoutée et la facilité de fabrication des produits les plus courants font que le malaxage des bétons a rarement fait l'objet de recherches approfondies. On peut toutefois citer les études menées par Shalon [2], Johansson [3], Beitzel [4, 5], Charonnat [6, 7] et Tamimi [8], sans oublier les études réalisées par Abrams au début du <sup>xx</sup>e siècle.

L'apparition relativement récente de nouvelles familles de béton, comme les bétons à hautes performances et les bétons autoplaçants, a mis en évidence un manque de connaissances, en particulier sur le malaxage. La fabrication des bétons autoplaçants, produits phares de ces dernières années, avec certains moyens de production existants s'avère notamment parfois délicate. Des études pour la mise au point des procédés de fabrication ont été entreprises dans plusieurs pays du monde. En France, le Laboratoire central des ponts et chaussées, qui dispose d'une station d'étude du malaxage à l'échelle industrielle [9], a entrepris plusieurs études sur ce domaine [10-12]. Il a été montré que la précision actuelle des centrales de béton prêt à l'emploi peut s'avérer insuffisante, le point critique étant le dosage en eau. De plus, des formules plus robustes sont plus coûteuses et nécessitent le plus souvent des temps de malaxage plus longs que pour les bétons courants.

Les difficultés rencontrées lors du malaxage des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) sont encore plus élevées. Ces produits, qui commencent à se faire une place sur le marché, constituent sans aucun doute un nouveau défi en matière de fabrication industrielle. Leur production est le plus souvent réalisée en usine, où le contrôle et la répétabilité sont plus faciles à respecter. Pour que le manque de productivité actuel ne soit pas un frein à leur développement, des études approfondies doivent encore proposer des séquences de malaxage améliorées : ordre d'introduction des constituants, temps de malaxage pour les différents niveaux transitoires de composition et type d'agitation.

On présente ici une étude expérimentale de laboratoire portant sur certains paramètres de malaxage d'un BFUP (présenté en [13-15]). Il s'agit de choisir un protocole de malaxage prenant en compte divers paramètres du procédé de malaxage : temps de malaxage, séquences d'introduction des composants et agitation. L'objectif est d'assurer à la fois une homogénéisation suffisamment rapide et l'obtention de caractéristiques du produit les plus favorables en termes de mise en œuvre et de résistance mécanique.

## EXPÉRIMENTATIONS

### ■ Matériaux

#### › Constituants

Le squelette granulaire des bétons est composé de sable de Fontainebleau ayant une étendue granulométrique de 0-400 µm, d'un ciment de Portland CEM1 52,5 PMES HTS du Teil et de fumée de silice SEPR non densifiée de couleur blanche. La fumée de silice a pour fonction d'améliorer la fluidité du mélange en comblant les vides entre les grains de ciment, et permet d'obtenir de meilleures résistances à la compression du fait de ses propriétés pouzzolaniques.

Afin de réduire le dosage en eau tout en conservant une maniabilité satisfaisante, un superplastifiant issu d'une nouvelle génération de polymères à base d'éther polycarboxylique est utilisé.

Les fibres d'acier commercialisées par la société SODETAL sont cylindriques, droites, de 10 mm de longueur et 200 µm de diamètre. Elles présentent une résistance à la traction de 2 000 MPa et un module de Young de 200 GPa.

#### › Formulation

Dans la recherche d'une séquence de malaxage favorable, on fait l'hypothèse que le temps de malaxage avec les fibres doit être le plus court possible. Cette hypothèse est vérifiée dans la seconde

partie de l'étude. Dans la première partie, on recherche un protocole de malaxage de la matrice (agitation et temps de malaxage) permettant l'obtention de propriétés favorables d'écoulement (importantes pour assurer rapidement la dispersion des fibres lors de leur introduction) et de résistance mécanique (afin d'éviter un malaxage supplémentaire avec les fibres).

Les formulations de la matrice seule et du béton fibré (BFUP) sont données dans le **tableau 1**. Cette composition met en évidence un fort dosage en ciment et en fumée de silice (26 % de la masse du ciment), un faible rapport eau/liant (ciment + fumée de silice) qui est de l'ordre de 0,14 et un dosage volumique en fibres qui s'élève à 5 %, soit 16 % en masse. Enfin, on note un dosage très élevé en superplastifiant puisque l'on recherche un caractère autoplaçant du béton.

La masse volumique théorique pour une teneur en air nulle est de 2,77 kg/dm<sup>3</sup> pour le béton fibré et de 2,45 kg/dm<sup>3</sup> pour la matrice seule.

**tableau 1**  
Formulation  
des matériaux étudiés.

Matériaux (kg/m <sup>3</sup> )	Ciment	Fumée de silice	Sable	Fibres	Super- plastifiant	Eau totale
matrice	1 267,4	329,5	883,2	0	33,9*	228,5
BFUP	1 051,1	273,3	732,5	468	28,1*	189,5

\* en phase aqueuse.

## ■ Procédé de fabrication

### > Malaxeur

La fabrication des bétons est réalisée par gâchées avec un malaxeur EIRICH R08W d'une capacité maximale de 75 litres (**figure 1**), utilisé ici pour des gâchées de 40 litres.

**figure 1**  
Malaxeur EIRICH R08.



Le malaxeur comprend :

- une cuve de mélange inclinée, effectuant un mouvement de rotation suivant deux vitesses disponibles : 0,38 t/s (V1) et 0,77 t/s (V2) ;
- un agitateur en étoile muni de dents sur son pourtour ; il peut tourner dans le même sens ou dans le sens contraire de la cuve avec une vitesse variable allant de 0,5 à 8,33 t/s ;
- un racleur de paroi, qui ramène le mélange vers le centre ;
- une fermeture de vidange, au centre de la cuve.

Dans la présente campagne expérimentale, quatre combinaisons de vitesses d'agitation (configurations de malaxage) ont été retenues : vitesse lente de la cuve avec vitesse de l'agitateur de 1,67 ou 4,17 t/s (V1-2 ou V1-4), vitesse rapide de la cuve avec vitesse de l'agitateur de 4,17 ou 8,33 t/s (V2-4 ou V2-8). Dans tous les cas, l'agitateur tourne dans le sens contraire de la cuve. Ces vitesses de rotation couvrent une plage potentielle d'utilisation industrielle des malaxeurs Eirich.

L'extrapolation à l'échelle industrielle des résultats du malaxage obtenus en laboratoire est une opération délicate. Le type d'agitation fourni par les malaxeurs Eirich est plus favorable que d'autres à une extrapolation des tendances d'évolution observées en laboratoire, grâce à une meilleure mise à l'échelle géométrique.

### ➤ Séquences de malaxage

Pour les essais sur la matrice, le ciment, la fumée de silice et le sable sec sont pré-malaxés pendant 60 s (temps de pré-malaxage). L'eau de gâchage et le superplastifiant pré-mélangés sont ensuite introduits dans le malaxeur (temps d'introduction d'environ 20 s). L'ensemble est alors malaxé pendant 60, 120, 300 ou 600 s. Le temps de malaxage (humide) est compté à partir du début de l'introduction de l'eau et du superplastifiant.

Après analyse des résultats, la configuration du malaxeur V2-4 est choisie pour la fabrication de trois gâchées de béton fibré avec trois protocoles différents. L'objectif est de vérifier l'hypothèse d'un effet favorable d'un temps de malaxage court avec les fibres. Lors de la première gâchée, l'introduction des fibres est effectuée en même temps que celle des autres constituants secs ; les fibres subissent donc toutes les phases de malaxage. Le temps de malaxage humide est de 390 s. Pour les deux autres gâchées, les fibres sont introduites après 60 s de pré-malaxage à sec et 300 s de malaxage humide. Les fibres sont incorporées dans la matrice en malaxant 90 s ou 180 s respectivement (temps de malaxage incluant le temps d'introduction des fibres d'environ 15 s).

D'une manière générale, on peut remarquer que les temps de malaxage et d'introduction fixés couvrent une plage de valeurs basses des temps pratiqués industriellement pour des produits similaires (compte tenu du volume plus réduit, les débits d'introduction sont eux sensiblement inférieurs aux débits des équipements industriels).

### ■ Mesures lors du malaxage

La puissance consommée par le malaxeur est mesurée par un wattmètre et enregistrée en continu. La plage de signal de sortie du wattmètre est 0-10 volts. L'exploitation de la puissance mesurée est réalisée en valeur relative, entre les différents temps de malaxage et les différentes compositions du mélange dans le malaxeur (s'agissant ici de mesures comparatives, le signal n'est pas converti en unité de puissance).

La puissance enregistrée est la puissance nécessaire au mouvement de l'outil d'agitation et n'inclut pas la puissance consommée par la cuve tournante. L'analyse porte sur la puissance utile consommée par l'agitateur. Pour déterminer la puissance utile, on s'affranchit de la puissance enregistrée avec le malaxeur vide. Cette puissance à vide est fonction de la vitesse de rotation de l'outil (soit 87,2 mV pour 1 t/s avec un coefficient de corrélation de 0,998).

## ■ Caractérisation des bétons

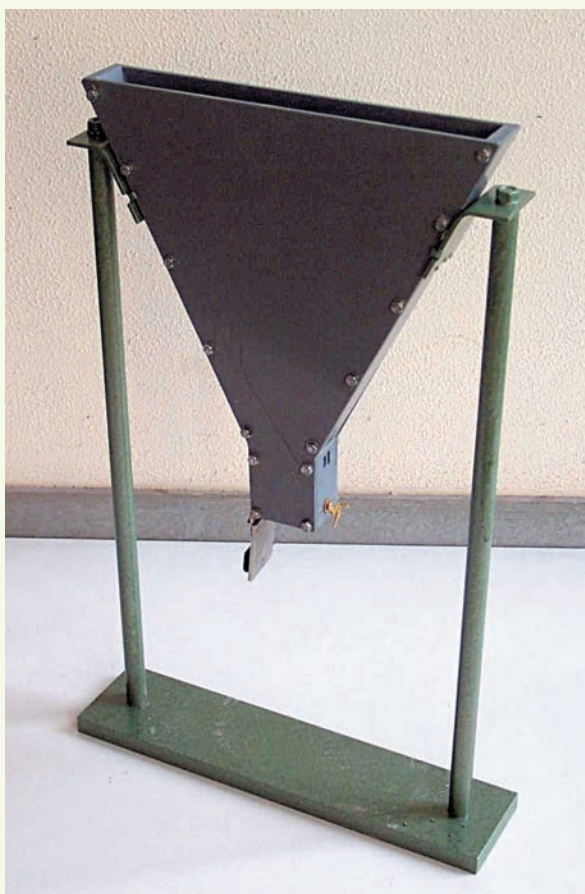
### › Béton à l'état frais

La caractérisation de la rhéologie des bétons à l'état frais est réalisée par un essai d'affaissement à l'aide d'un mini-cône, dont les dimensions sont la moitié de celles du cône d'Abrams. De manière complémentaire, on mesure le temps d'écoulement à l'aide de deux essais différents. Pour la caractérisation de la matrice, on utilise la trémie V-Funnell pour mortier (figure 2) et pour caractériser les propriétés d'écoulement du béton fibré le maniabilimètre LCL.

Cinq mesures d'étalement au mini-cône sont réalisées pour chaque fabrication de la matrice. Dans tous les autres cas (étalement des bétons fibrés, temps d'écoulement au V-Funnell ou au maniabilimètre), les essais sont réalisés une seule fois.

figure 2

Matériel d'essai sur béton frais V-Funnel.



### › Béton à l'état durci

La résistance en traction par flexion est mesurée sur six éprouvettes  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  à quatorze jours de maturation en eau à  $20^\circ\text{C}$ .

Avant l'essai de flexion, les éprouvettes sont mesurées et pesées (afin de déterminer leur masse volumique), puis leur module élastique dynamique est déterminé avec un dispositif de mesure non destructif (le *Grindosonic*). Les éprouvettes sont excitées par une légère impulsion mécanique, qui crée une vibration transitoire. Cette vibration est déterminée par la géométrie et les propriétés physiques de l'échantillon. Un détecteur piézo-électrique permet de capter la vibration propre et de la transformer en signal électrique. Les résultats apparaissent sous forme de fréquence de résonance exprimée en hertz. Le dispositif est doté d'un logiciel qui convertit les fréquences en modules d'élasticité en utilisant un modèle fondé sur la théorie des vibrations libres.



Après la rupture en flexion, les deux fragments de chaque éprouvette  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  sont écrasés (sans surfaçage), ce qui permet d'avoir la résistance en compression (douze valeurs pour une gâchée). Tous les essais mécaniques (flexion et compression) sont pilotés en force.

## ■ Programme expérimental

L'ensemble des seize fabrications de la matrice et des trois fabrications du BFUP (matrice plus fibres) ainsi que les essais de caractérisation sont présentés dans le [tableau 2](#).

**tableau 2**  
Identification des  
protocoles de fabrication  
et des essais de  
caractérisation.

Nom code essai	Formule	Configuration de malaxage	Malaxage humide (dont avec fibres)	Essais béton frais	Essais béton durci
V1-2-1	matrice	V1-2	60 s (-)	4 à 5 étalements au mini-cône  écoulement V-Funell	sur 6 éprouvettes  module élastique, M  masse volumique, m <sub>v</sub>  résistance en flexion, R <sub>f</sub>  résistance en compression, R <sub>c</sub>
V1-4-1		V1-4			
V2-4-1		V2-4			
V2-8-1		V2-8			
V1-2-2		V1-2	120 s (-)		
V1-4-2		V1-4			
V2-4-2		V2-4			
V2-8-2		V2-8			
V1-2-5		V1-2	300 s (-)		
V1-4-5		V1-4			
V2-4-5		V2-4			
V2-8-5		V2-8			
V1-2-10		V1-2	600 s (-)		
V1-4-10		V1-4			
V2-4-10		V2-4			
V2-8-10		V2-8			
F6,5	BFUP	V2-4	390 s (390 s)	mini-cône maniabilimètre	Idem sur 3 éprouvettes
5F1,5			390 s (90 s)		
5F3			480 s (180 s)		

## RÉSULTATS

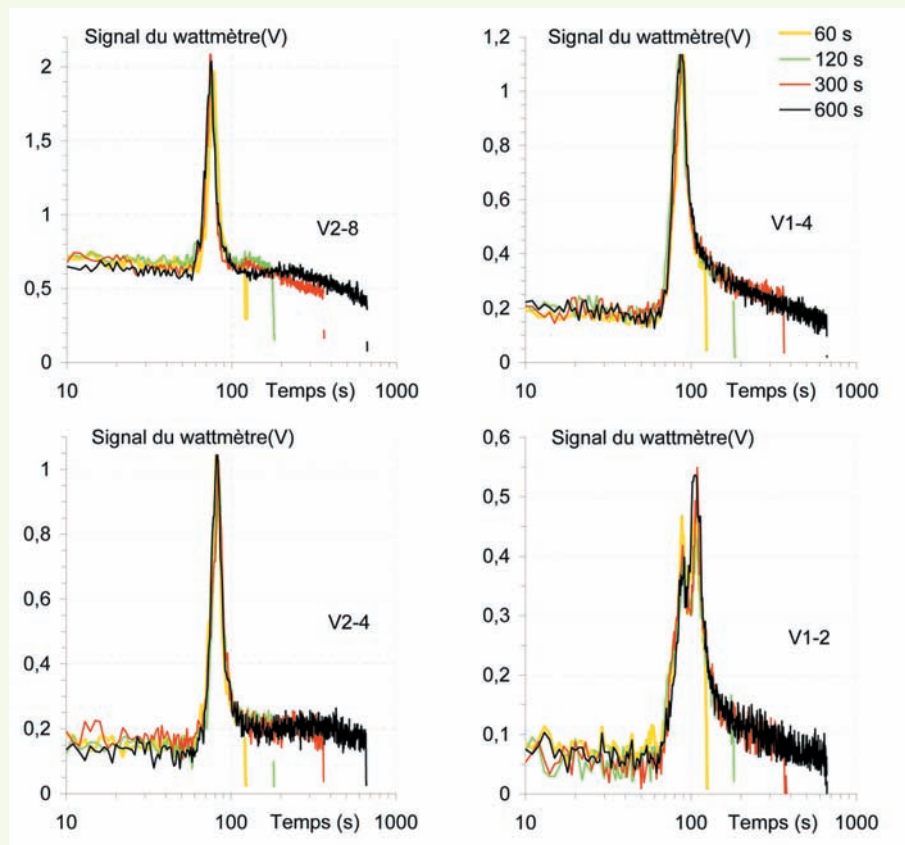
### ■ Puissance de malaxage

L'enregistrement de la puissance de malaxage instantanée dans les seize protocoles de fabrication de la matrice ([figure 3](#)) met en évidence la première minute de pré-malaxage « à sec », suivie de l'introduction des constituants liquides et de la vidange du malaxeur (chute de la puissance après un temps de malaxage de une, deux, cinq ou dix minutes).

Pour le malaxage humide, on peut distinguer trois phases. L'introduction des constituants liquides produit d'abord une augmentation importante de la puissance de malaxage, résultat probable de l'augmentation de la cohésion entre les particules (matériau granulaire non saturé). Le mélange se transforme ensuite progressivement en une suspension granulaire (matériau granulaire saturé), ce qui peut être associé à la baisse de la puissance nécessaire au malaxage. Une fois cette « fluidification » terminée, la baisse de la puissance devient moins rapide. Cette nouvelle étape du malaxage est probablement un phénomène de désagglomération ou de mouillage d'éléments fins et très fins dans un fluide, sous l'effet conjugué de l'homogénéisation des constituants liquides et du cisaillement dans le malaxeur.

**figure 3**

Évolution de la puissance instantanée de malaxage (sortie en volts non convertie en watts) pour les seize protocoles de fabrication de la matrice.



Pour toutes les fabrications, on remarque qu'il n'y a pas de stabilisation définitive de la puissance de malaxage pendant la fabrication. Lorsque la cuve est en rotation lente, la puissance décroît de manière monotone avec le temps de malaxage après la zone de fluidification. Pour la vitesse de rotation de la cuve la plus rapide, une stabilisation et une légère remontée de la puissance avec le temps sont observées avant une nouvelle décroissance.

Dans la configuration du malaxeur la plus lente (V1-2), deux pics de puissance sont observés. On suppose que les constituants liquides, se déplaçant moins vite dans la cuve, arrivent une seconde fois dans la zone de l'agitateur avant qu'une homogénéisation suffisante du mélange soit encore présente. L'analyse visuelle conforte cette hypothèse. Le béton fabriqué dans cette configuration présente des zones de matériau solide non humidifié (hétérogénéités macroscopiques visibles), alors que la vidange intervient lorsque la puissance de malaxage baisse encore très rapidement avec le temps de malaxage.

Pour la configuration d'agitation la plus rapide (V2-8), on constate une perte de répétabilité de l'enregistrement de puissance, en comparant avec les autres configurations de malaxage. Pour les quatre protocoles de fabrication concernés, la baisse de la puissance n'est pas monotone (dans la phase de désagglomération d'éléments fins). On suppose cette fois que la vitesse très rapide de l'agitateur produit des ségrégations dans la suspension granulaire nouvellement formée avant qu'un régime d'écoulement permanent dans le malaxeur soit installé.

La puissance mesurée lors de la fabrication des bétons avec fibres est représentée sur la [figure 4](#). On indique dans la même figure, à titre de référence, la puissance enregistrée lors du protocole de fabrication de la matrice V2-4-10, réalisé avec la même configuration du malaxeur.

La présence des fibres augmente considérablement la puissance consommée par le malaxeur (elle est environ le double pour les fabrications étudiées). Lorsque les fibres sont présentes lors de l'in-

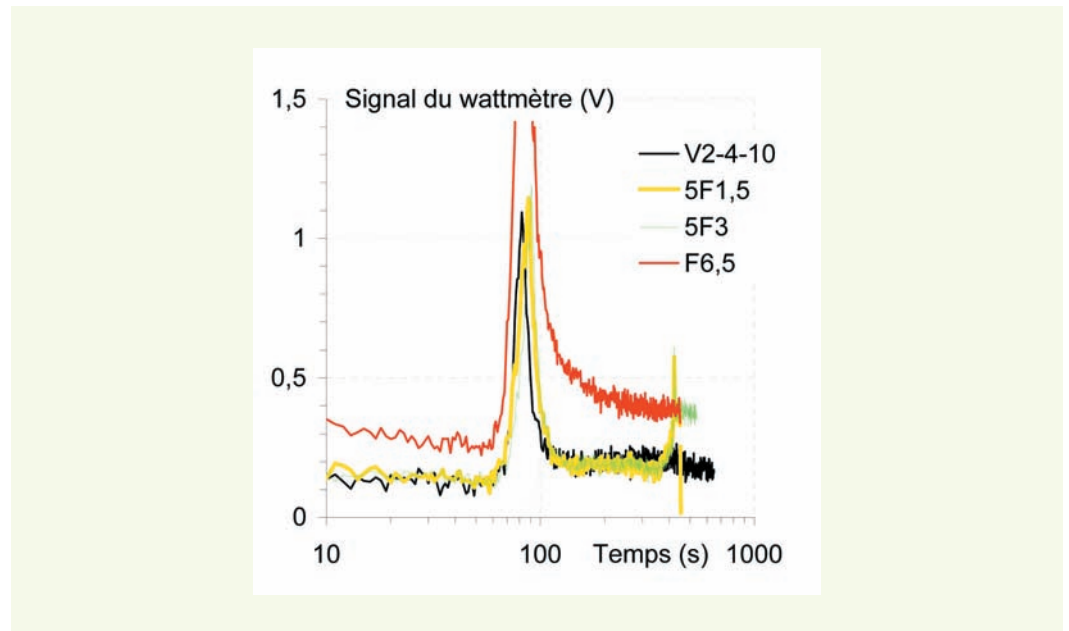
roduction de l'eau, le pic de puissance que le malaxeur doit pouvoir fournir devient très important. L'introduction des fibres après cinq minutes de malaxage humide de la matrice est associée également à un pic de puissance, toutefois inférieur au pic d'introduction d'eau.

## ■ Essais sur la matrice

L'influence du temps de malaxage et de la configuration du malaxeur sur les propriétés du béton frais et du béton durci est indiquée sur la **figure 5**.

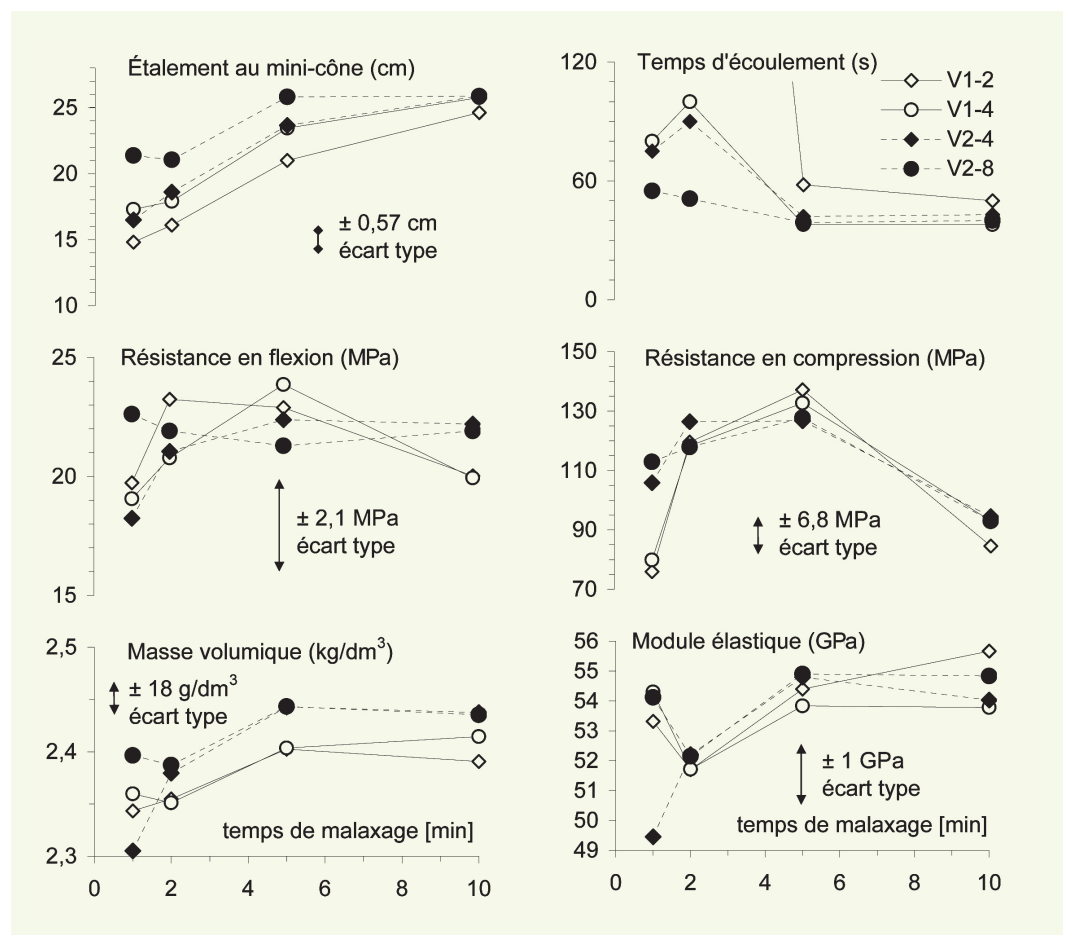
**figure 4**

Évolution de la puissance instantanée de malaxage (sortie non convertie, en V) lors des trois fabrications des BFUHP et de la matrice dans la même configuration du malaxage (V2-4).



**figure 5**

Influence du temps de malaxage et de la configuration du malaxeur sur les propriétés de la matrice à l'état frais (étalement au mini-cône et temps d'écoulement V-Funell) et après durcissement (résistances en flexion et en compression, masse volumique et module élastique).





### > Propriétés d'écoulement

Sur béton frais, les mesures d'étalements au mini-cône sont cohérentes avec celles du temps d'écoulement au V-Funell. En considérant cinq zones de caractérisation pour chacun de ces essais (**tableau 3**), une seule inversion significative dans le classement des protocoles de fabrication est observée (protocole V1-4-5). On remarque que, pour cette campagne expérimentale, l'essai d'étalement est plus précis pour la caractérisation du béton frais : en effet, la valeur d'étalement indiquée dans le **tableau 3** est la moyenne de plusieurs mesures pour chaque protocole de fabrication, alors qu'il y a une seule mesure de temps d'écoulement ; de plus, les longs temps d'écoulement (> 100 s) sont essentiellement le reflet d'un blocage de la matrice dans la trémie V-Funell et il n'y a pas de discrimination possible entre les protocoles respectifs de fabrication.

**tableau 3**  
Classement des protocoles  
de fabrication avec les  
mesures d'écoulement.

Étalement au mini-cône (cm)			Temps d'écoulement au V-Funell (s)		
< 16	V1-2-1	14,8	> 100	V1-2-1	> 100
	V1-2-2	16,1		V1-2-2	> 100
16-19	V2-4-1	16,5	60-100	V1-4-2	100
	V1-4-1	17,3		V2-4-2	90
	V1-4-2	17,9		V1-4-1	80
	V2-4-2	18,6		V2-4-1	75
19-22	V1-2-5	21,0	50-60	V1-2-5	58
	V2-8-2	21,1		V2-8-1	55
	V2-8-1	21,4		V2-8-2	51
22-25	<b>V1-4-5</b>	23,5	40-50	V1-2-10	50
	V2-4-5	23,7		V2-4-10	43
	V1-2-10	24,6		V2-4-5	42
> 25	V1-4-10	25,8	< 40	V2-8-10	40
	V2-8-5	25,8		V2-8-5	39
	V2-8-10	25,9		<b>V1-4-5</b>	38
	V2-4-10	25,9		V1-4-10	38

Des améliorations significatives des propriétés d'écoulement de la matrice (étalement plus grand, temps d'écoulement plus court) sont constatées avec l'augmentation du temps de malaxage et de la vitesse angulaire de l'agitateur. Pour juger de l'influence de diverses configurations du malaxeur, l'écart-type moyen de l'essai d'étalement<sup>1</sup> est comparé avec la différence moyenne entre les deux configurations (moyenne des valeurs absolues d'écarts entre les deux configurations aux mêmes temps de malaxage). Dans le cas de l'étalement, la différence entre les configurations V1-4 et V2-4 (avec une même vitesse de rotation de l'agitateur mais des vitesses de la cuve différentes) est inférieure à l'écart-type moyen de l'essai (0,46 cm par rapport à 0,57 cm). L'analyse graphique du temps d'écoulement laisse présager un résultat similaire (on ne dispose pas de l'écart-type moyen de l'essai). On en conclut que l'évolution des propriétés d'écoulement avec le temps de malaxage est indépendante de la vitesse de rotation de la cuve. Elle semble dépendre seulement de la vitesse de rotation de l'agitateur. Plus l'agitation est forte, plus l'écoulement est important (voir la comparaison des configurations V1-2 et V1-4 et des configurations V2-4 et V2-8).

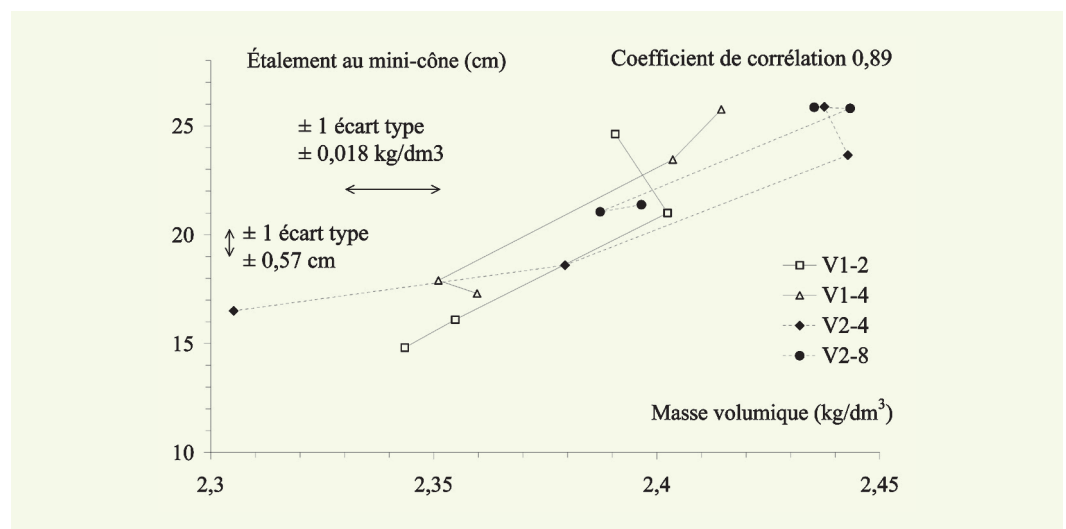
<sup>1</sup> L'écart-type moyen est déterminé pour toutes les mesures répétées lors de cette campagne expérimentale : étalement, masse volumique, résistance en flexion, résistance en compression et module élastique. Dans chaque configuration de fabrication (seize configurations), on détermine l'écart entre deux mesures successives (pour l'étalement, il y a cinq mesures par configuration, donc quatre écarts). La variance de ces écarts  $s_{\Delta}^2$  est utilisée pour calculer l'écart-type moyen  $s$  avec la relation statistique :  $s \sim s_{\Delta}/\sqrt{2}$ .

L'évolution avec le temps de malaxage montre qu'au moins cinq minutes de malaxage humide sont nécessaires pour obtenir des propriétés d'écoulement favorables (c'est-à-dire proches de valeurs maximales constatées lors de cette campagne expérimentale). Il est également préférable de ne pas utiliser la configuration V1-2 du malaxeur.

### ► Propriétés du béton durci

L'amélioration des propriétés d'écoulement est bien corrélée avec l'augmentation de la masse volumique du béton durci (coefficient de corrélation de 0,89 ; **figure 6**). On peut juger que la disparition progressive des agglomérats d'éléments fins, qui entraîne une augmentation de l'étalement, a également comme effet une diminution de la quantité d'air retenue dans les agglomérats. Toutefois, en ce que concerne la masse volumique, et contrairement aux propriétés d'écoulement, la vitesse de rotation de la cuve est un facteur influant alors qu'il ne semble pas y avoir d'influence significative du changement de la vitesse angulaire de l'agitateur (**figure 5**). En effet, la différence moyenne entre les configurations V1-2 et V1-4 et entre les configurations V2-4 et V2-8 est de 11 et 4 g/dm<sup>3</sup> respectivement, valeurs inférieures à l'écart-type moyen de l'essai (18 g/dm<sup>3</sup>). De plus, la différence de masse volumique entre les configurations avec vitesses de rotation de la cuve lente et rapide est le double (35 g/dm<sup>3</sup>) de l'écart-type moyen de l'essai. Le caractère systématique de cette différence (la masse volumique augmente systématiquement avec la vitesse de rotation de la cuve) incite à conclure à un effet de la vitesse de rotation de la cuve sur la masse volumique. Le temps de malaxage d'une minute des configurations V2-4 et V2-8 n'est pas pris en considération, son écart (91 g/dm<sup>3</sup>) étant considéré comme atypique.

**figure 6**  
Corrélation entre la masse volumique de la matrice durcie et l'étalement au mini-cône.



L'écart-type moyen de la mesure de la masse volumique est d'environ 1 % de la valeur mesurée. Les essais de résistance en compression et en flexion sont moins précis (environ 6 % pour la compression et 10 % pour la flexion). Il ne semble pas possible de mettre en évidence par ces résultats une influence de la configuration du malaxeur. Si une influence existe, elle est faible. L'exception notable est le temps de malaxage court (une minute) où la vitesse lente de la cuve est défavorable à la résistance en compression. Comme pour la masse volumique, il ne semble pas y avoir d'influence de la vitesse de rotation de l'agitateur.

Les déterminations du module élastique n'apportent pas d'éléments nouveaux dans l'évaluation de l'influence de la configuration du malaxeur.

Un malaxage humide de deux minutes semble suffisant pour obtenir des résistances en compression et en traction dans la plage haute des mesures obtenues lors de cette campagne d'essais. L'augmentation de densité à cinq minutes de malaxage humide incite à un malaxage plus long. Toutefois, si l'on dépasse cinq minutes, les propriétés du béton durci se dégradent ou n'évoluent plus. Cette dégradation est manifeste (une chute d'environ 30 %) pour la résistance en compression

avec dix minutes de malaxage, quelle que soit la configuration du malaxeur. Cette chute de résistance ne s'explique pas par la porosité des éprouvettes (la densité étant maximale avec dix minutes de malaxage) mais pourrait résulter de la formulation inappropriée de la matrice car les proportions de ses différents constituants sont établies en considérant le matériau avec fibres. Pour la matrice seule, le dosage en eau est certainement trop élevé. Une fois la dispersion des éléments fins bien avancée (temps de malaxage long), le matériau est potentiellement instable.

### > Choix du protocole

Lors de la fabrication des BFUP, l'objectif est d'obtenir une matrice suffisamment fluide avant l'introduction des fibres, sans dégradation des propriétés mécaniques. On choisit un temps de malaxage humide (sans fibres) de cinq minutes dans la configuration V2-4 du malaxeur. Cette configuration assure à la fois une augmentation rapide de la résistance en compression et de l'étalement avec le temps de malaxage, tout en évitant les instabilités observées sur la courbe de puissance dans la configuration V2-8.

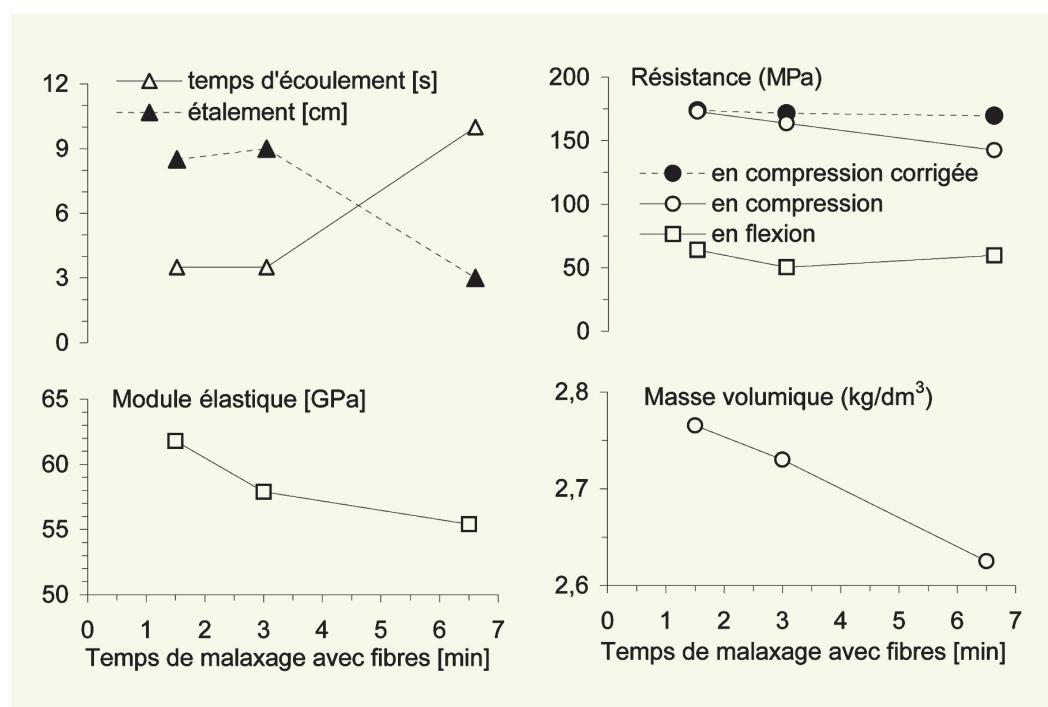
## ■ Essais sur le béton fibré

### > Propriétés d'écoulement

Les mesures d'étalement au mini-cône et de temps d'écoulement au maniabilimètre montrent que le pré-malaxage des fibres avec les autres constituants solides avant le malaxage humide (temps de malaxage avec fibres de 390 s ; **figure 7**) est fortement défavorable aux propriétés d'écoulement. Pour ce protocole de fabrication, le béton obtenu n'a pas les propriétés d'un béton autoplaçant.

On remarque que les mesures par les deux méthodes (étalement au mini-cône et temps d'écoulement au maniabilimètre) sont très bien corrélées.

**figure 7**  
Influence du temps de malaxage avec les fibres sur les propriétés du béton fibré à ultra-hautes performances.



### > Propriétés du béton durci

L'augmentation du temps de malaxage avec les fibres entraîne une diminution marquée de la masse volumique du béton durci et donc une augmentation de sa porosité. La baisse de masse volumique est corrélée à une diminution de maniabilité. Ceci pourrait s'expliquer par un agencement plus ou moins favorable des fibres dans le mélange pour des temps de malaxage différents avec les fibres. On peut imaginer qu'un temps plus long aurait comme effet un enchevêtrement des fibres. Celui-ci nuirait à l'écoulement du béton (les observations visuelles le confirment) et amplifierait l'entraîne-

ment d'air dans l'espace interstitiel des fibres (*cf.* mesures de densité). La teneur en air estimée sur le béton fibré, déduite de la densité réelle du béton durci sec, est presque le double de celle déduite sur la matrice.

L'entraînement d'air explique la diminution du module élastique et de la résistance en compression. En effet, la résistance en compression corrigée<sup>2</sup> par rapport à la teneur en air n'évolue pratiquement pas avec le protocole de fabrication. L'écart maximal des trois valeurs de résistance en compression corrigée est de 2,5 MPa alors que l'écart-type moyen de l'essai sur béton fibré est de 7,9 MPa.

En ce que concerne la résistance en flexion, il est difficile de conclure à une évolution en fonction du temps de malaxage avec fibres. L'écart maximal entre les protocoles (7,3 MPa) est grand mais du même ordre de grandeur que l'écart-type moyen de l'essai sur béton fibré (8,0 MPa). On peut remarquer que l'écart-type moyen de l'essai de résistance en flexion sur le béton sans fibres était bien inférieur (2,1 MPa).

## DISCUSSION

On constate que l'augmentation du temps de malaxage n'entraîne pas systématiquement une amélioration des propriétés mécaniques. Il ne semble donc pas utile de prolonger le malaxage au-delà de cinq minutes. À ce moment, l'essentiel des propriétés d'écoulement est acquis et toutes les propriétés du béton durci mesurées se trouvent à leurs valeurs maximales : résistance en compression, résistance en flexion, densité, module élastique. Une dégradation de la méso-structure des fibres avec le temps de malaxage est observée. Elle produit une diminution sensible des propriétés d'écoulement et génère un entraînement d'air dont l'effet est une diminution de la résistance en compression et du module élastique.

Les temps de malaxage optimisés sont alors de cinq minutes pour la matrice, suivis de une minute et trente secondes d'incorporation et de malaxage des fibres. Il est possible que le temps de malaxage de la matrice puisse être réduit du temps de malaxage avec les fibres mais cette modalité n'a pas été testée ici. Une réduction du temps de malaxage avec les fibres mériterait aussi d'être étudiée, à condition que l'introduction de fibres dans de bonnes conditions (introduction de fibres dispersées) puisse être rendue suffisamment rapide. Rappelons aussi que le temps de malaxage à sec a été gardé constant lors des essais.

L'introduction des fibres lors du malaxage à sec n'a pas donné de résultats encourageants, en cohérence d'ailleurs avec la pratique usuelle et la conclusion précédente qui recommande une réduction du temps de malaxage avec les fibres. De nombreux autres aspects liés aux séquences d'introduction seraient à étudier. L'introduction différée des adjuvants liquides, par exemple, est un protocole souvent utilisé dans la pratique. L'allongement probable du temps total de malaxage pourrait être compensé par l'obtention d'un meilleur jeu de propriétés d'usage (béton autoplaçant avec moins d'eau donc avec de meilleures propriétés mécaniques). Ceci dépend cependant de la nature chimique de l'adjuvant (ici fixée) et une étude spécifique pourrait être menée sur cet aspect particulier.

Les quatre combinaisons de vitesses d'agitation retenues couvrent une large plage. Dans la configuration à faible vitesse V1-2, le matériau ne s'homogénéise pas assez rapidement. Dans la configuration à grande vitesse V2-8, il semble qu'une ségrégation apparaisse dans la pâte nouvellement formée. Alors que ces deux configurations extrêmes sont faciles à écarter, il est plus délicat de décider de la meilleure combinaison des vitesses entre les deux restantes. La vitesse V2 de la cuve

<sup>2</sup> La résistance en compression corrigée  $f_c^0$  correspondant à un béton de teneur en air nulle, est déterminée par une conséquence de la formule de Féret :

$$f_c^0 = f_c \left[ 1 + \frac{V_a}{V_c + V_e} \right]^2$$

où  $f_c$  est la résistance en compression mesurée,  $V_a$  la proportion volumique d'air dans l'éprouvette,  $V_c$  et  $V_e$  les proportions volumiques dans le béton frais de ciment et d'eau respectivement.

a été choisie ici en raison d'une montée de la résistance mécanique plus rapide avec le temps de malaxage. Les densités sont également supérieures pour la vitesse V2 de la cuve.

Lors des essais sur la matrice, il a été constaté que les propriétés d'écoulement du béton frais ne varient pas avec la vitesse de rotation de la cuve, alors qu'elles sont fortement dépendantes de la vitesse angulaire de l'agitateur. Pour les propriétés du béton durci, on observe un phénomène inverse : une évolution avec la vitesse de rotation de la cuve et une apparente indépendance par rapport à la vitesse angulaire de l'agitateur. Ces observations contradictoires restent surprenantes. À ce stade de réflexion, on peut penser que l'évolution des propriétés mécaniques est liée à un processus de dispersion de l'eau dans le mélange. Celle-ci, même si elle n'enrobe pas chaque particule lors du malaxage, arrive à hydrater en profondeur un agglomérat d'une taille raisonnable. Les propriétés mécaniques ne souffrent alors pas d'une désagglomération insuffisante, pourvu que celle-ci ait toutefois atteint un certain niveau (admettons comme ordre de grandeur 50  $\mu\text{m}$ ). Ceci n'est pas le cas des propriétés d'écoulement où le rapport entre les plus petits et les plus gros diamètres joue fortement. Pour que l'étalement évolue, il est nécessaire que l'adjuvant puisse jouer son rôle dispersant, et donc qu'il soit réparti à une échelle inférieure à celle indiquée précédemment. On peut imaginer que le mouvement de l'agitateur produit un mouvement dispersant à une échelle inférieure à celle produite par le mouvement de la cuve. Une vitesse de rotation plus élevée de la cuve amène plus souvent le matériau sur le séparateur qu'est l'agitateur ; une vitesse angulaire plus élevée de l'agitateur introduit plus d'énergie dans le mouvement des particules. Ces hypothèses nécessitent toutefois une analyse plus approfondie.

Le temps de malaxage a une influence dominante par rapport à la combinaison de vitesses d'agitation. Ceci explique la bonne corrélation entre la densité du béton durci et l'étalement du béton frais. Ces propriétés évoluent de la même manière avec le temps de malaxage, ce qui rend négligeables les différences de comportement avec les paramètres du système d'agitation.

Une autre observation (il faut rappeler toutefois qu'elle ne se fonde que sur peu de mesures) est l'excellente corrélation entre les mesures de temps d'écoulement (V-Funell pour la matrice et mania-bilimètre pour le béton fibré) et l'étalement au mini-cône. En théorie, le temps d'écoulement est une caractéristique liée essentiellement à la viscosité du béton frais, alors que l'étalement est une grandeur davantage liée à son seuil d'écoulement. On pourrait supposer une variation simultanée et du même ordre du seuil et de la viscosité avec le protocole de malaxage.

## CONCLUSION

Parmi les protocoles testés, le plus favorable du point de vue des propriétés du béton a été choisi ici. Le paramètre dominant du procédé de fabrication semble être le temps de malaxage. Pour le protocole de fabrication, un malaxage humide de cinq minutes semble suffisant pour que la matrice atteigne les propriétés mécaniques optimales. Le prolongement du malaxage avec les fibres entraîne une augmentation de la teneur en air et donc une chute des propriétés mécaniques du béton durci. D'autres paramètres de fabrication peuvent influencer les propriétés mécaniques de la matrice. Une vitesse d'agitation trop rapide génère des ségrégations du squelette granulaire, alors qu'une vitesse trop lente impose un temps de malaxage de la matrice plus long. La combinaison des vitesses du malaxeur peut influencer différemment les propriétés du béton frais et celles du béton durci. Enfin, l'introduction de fibres avant l'introduction de la phase liquide génère une perte notable des propriétés mécaniques du béton produit.

Toutes les pistes pour la réduction du temps de malaxage total n'ont cependant pas été analysées. On peut penser en particulier à l'introduction de fibres après un temps de malaxage de la matrice plus court, même si celle-ci n'avait pas encore, dans ces conditions, des propriétés mécaniques optimales. L'introduction différée du superplastifiant (en totalité ou en partie) dans l'eau mériterait également une analyse approfondie.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 AFGC Groupe de travail BFUP, *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*, Recommandations provisoires, SETRA F0211, janvier **2002**, 151 pages.
- 2 SHALON R., REINITZ, Mixing Time of Concrete - Technological and Economical aspects, Building Research Station, *Technion*, Haifa, Research Paper **7**, **1958**.
- 3 JOHANSSON A., The relationship between mixing time and type of concrete mixer, *Proceedings NR42*, Stockholm, Handlingar, **1971**, pp. 92.
- 4 BEITZEL H., *Efficiency of Concrete Mixers - Report on assessment and classification of performances of mixers*, RILEM TC 150-ECM, **1998**.
- 5 BEITZEL H., Influence of mixing-procedures on the production of self-compacting concrete, *Concrete Precasting Plant and Technology*, vol. **67**, **1**, **2001**, pp. 12-13.
- 6 CHARONNAT Y., *Malaxage des matériaux - homogénéisation, ségrégation, qualité d'enrobage*, Bilan du thème de recherche LCPC/CH 10, **1996**.
- 7 BAROUX R., CHARONNAT Y., Malaxage des matériaux granulaires utilisés en génie civil, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **153**, **1988**.
- 8 TAMIMI A.K., The Effect of a New Mixing Technique on the Properties of the Cement Paste-Aggregate Interface, *Cement and Concrete Research*, vol. **24**, **7**, **1994**, pp. 1299-1304.
- 9 CHARONNAT Y., Efficiency of concrete mixers : the mixer test station, Production methods and Workability of Concrete, *Proceedings of the international RILEM conference*, E&FN SPON, June, **1996**, pp. 3-10.
- 10 CHOPIN D., *Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplacants : optimisation des temps de malaxage*, Thèse de doctorat de l'École centrale de Nantes, **2001**.
- 11 CAZACLIU B., VANDANJON P.-O., CHOPIN D., de LARRARD F., Current Issues In Concrete Mixing Research, *Proceedings of the International Conference : Innovations and Developments in Concrete Materials And Construction* Éd. Ravindra K DHIR, Peter C HEWLETT, Laszlo J CSETENYI, Dundee, September **2002**, pp 837-847.
- 12 DE LARRARD F., CAZACLIU B., CHOPIN D., CHATEAU E., Production of Self-Compacting Concrete, *Third International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, **2003**, pp. 481-494,
- 13 ROSSI P., PARANT É., LAURENCE O., FAKRI P., ARCA A., Comportement mécanique d'un nouveau composite cimentaire à écrouissage positif. Comportement en flexion, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **238**, **2002**.
- 14 TAILHAN J.-L., ROSSI P., PARANT É., CLÉMENT J.-L., ARCA A., Comportement en traction uni-axiale d'un composite cimentaire à écrouissage positif à partir d'une approche inverse, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **248**, **2004**.
- 15 PARANT É., ROSSI P., Mécanismes d'endommagement d'un composite cimentaire fibré multi-échelles. I. Endommagement sous sollicitations impulsives et II. Endommagement en fatigue, *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, **248**, **2004**.