



L'esprit de recherche au cœur des réseaux



Projet National : BETONS AUTOPLAÇANTS

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

el RMGC02
Doc 3670

Malaxage de Bétons AutoPlaçants

Influence du temps de malaxage et du type de malaxeur

Rapport de contrat pour le projet national BAP

Bogdan CAZACLIU, Michel DAUVERGNE

DOCUMENTATION

DIRECTION DE LA RECHERCHE
ET DES AFFAIRES SCIENTIFIQUES
ET TECHNIQUES

Bouguenais, le 26.9.2002

- Président : Yves MALIER - Vice-Président : Gérard PONS
- Directeur : Michel GUERINET - E.C.G.D. - Tour Morane - 3, avenue Morane Saulnier - 78140 Vélizy Villacoublay
Tél.: 01 34 65 87 96 - Fax : 01 34 65 87 07 - e-mail : mguerinet@eiffageconstruction.com
- Gestion administrative et financière

IREX - 10, rue Washington - 75008 PARIS - Tél. : 01 44 13 32 79 ou 77 - Fax : 01 43 59 68 30 e-mail IREX@wanadoo.fr

RMGC02-023

R103/BAP/3.1/16
cc10/BAP/3.1/17
3.11/13

ISRN EQ-DRAST-MGC--02-23--FR

Malaxage de Bétons Autoplaçants

Influence du temps de malaxage et du type de malaxeur

Rapport de contrat pour le projet national B@P

Bogdan CAZACLIU, Michel DAUVERGNE

Les bétons auto-plaçants sont des produits de conception récente. L'intérêt pour leur emploi est manifeste, et il est même supposé que cette technique remplacera à terme, la technique classique des bétons vibrés, dans bon nombre d'applications [1]. Les demandes d'utilisation de Bétons Auto-Plaçants dans le domaine du Génie Civil et du BTP, font naître un besoin de maîtrise de leur fabrication en centrales de Béton Prêt à l'Emploi. En effet, les formules BAP sont en général plus « pointues » que celles des bétons ordinaires et certaines de leurs particularités mettent en garde quant aux précautions nécessaires à leur fabrication. C'est le cas, par exemple, de leur sensibilité à la ségrégation.

Il existe essentiellement deux principaux défis technologiques à relever avant d'envisager une bonne maîtrise du procédé de fabrication en centrale BPE, indépendamment de la formule de BAP et de la nature et du conditionnement de constituants :

- le premier est d'assurer des tolérances adéquates lors du dosage. Parmi les imprécisions de dosage en production industrielle, celle relative à l'eau influe le plus sur les propriétés d'usage du béton. Cette imprécision est étroitement liée à un déficit de connaissance de la teneur en eau des granulats à l'entrée du malaxeur. Ce problème est traité par la SEMR Blois dans le cadre du projet national BAP et a déjà fait l'objet de deux rapports de recherche [4], [5] ;
- le deuxième défis technologiques concerne l'optimisation des paramètres du malaxage.

Le béton est un matériau hétérogène par nature. Lors de son malaxage, on a deux objectifs :

- on recherche d'une part, à lui assurer une l'homogénéité d'ensemble. Il s'agit d'une distribution uniforme des grosses particules (sables, gravillons) et de la pâte dans le volume, à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif ;
- d'autre part, on vise l'obtention d'un mélange ordonné (structuré), à une échelle microscopique. La micro-structuration concerne les particules fines qui doivent se répartir autour d'autres particules plus grosses, et la phase liquide (eau, adjuvants) qui doit mouiller convenablement les éléments fins.

La fabrication du béton prêt à l'emploi est caractérisée plutôt par des systèmes d'agitation simples et par une introduction de l'eau, au moins en partie, juste après les composants solides. Pour les bétons courants, le temps de malaxage est prévu par la norme française [2]. Pour les bétons fortement adjuvantés (avec des super plastifiants), le temps de malaxage est choisi en fonction du temps de stabilisation de la courbe de puissance consommée. Or, celui-ci est souvent long, ce que diminue la productivité et augmente les coûts de production.

Pour la fabrication de BAP, il faudrait donc étudier :

- si le temps de stabilisation est le temps de malaxage optimum, ou, si les caractéristiques du béton (résistance, rhéologie ...) sont suffisantes après un temps de malaxage plus court ;
- si le malaxage en plusieurs phases des bétons fortement adjuvantés ou/et riches en fines, constitue une amélioration du processus de fabrication ;
- s'il est nécessaire d'utiliser des systèmes d'agitation plus complexes ;
- si certaines formules sont plus faciles à malaxer que d'autres, à performances du béton équivalentes ;
- si le transport en toupie est un facteur de dégradation de la qualité du béton, ou si au contraire, il pourrait offrir le délai nécessaire pour l'achèvement du malaxage ;
- si la mesure de la teneur en eau pourrait être un indicateur de l'homogénéisation du matériau lors du malaxage (au même titre que la mesure de la puissance consommée).

200-07-073

Une thèse réalisée au LCPC [3], recherche incluse dans le projet national BAP, a permis d'apporter des éléments de réponse sur certains de ces points. Une étude bibliographique sur les connaissances acquises au niveau international sur le malaxage des béton en fait également partie.

Objectif et description de l'étude

En complément de résultats précédemment acquis, et portant en majorité sur des BHP, nous proposons ici l'étude de l'influence du temps de malaxage et du système de fabrication pour une formule industrielle de béton auto plaçant.

L'expérimentation consiste à fabriquer, à la station d'étude du malaxage du LCPC, la même formule dans deux malaxeurs différents et, pour chacun d'eux, à quatre temps de malaxage différents. Les propriétés des huit bétons produits sont ensuite analysées par des essais de caractérisation sur le béton frais et sur le béton durci :

- Rhéomètre, étalement, boîte en L, stabilité au tamis
- Résistance en compression, perméabilité¹ au gaz.

Nous nous intéressons à l'évolution des propriétés moyennes d'une part, et à l'hétérogénéité de ces propriétés dans la gâchée d'autre part.

Enfin, des mesures complémentaires pour fixer les conditions de l'expérimentation sont réalisées (masse volumique, teneur en air, teneur en eau et température du béton, teneur en eau des granulats, température de l'air). Lors du malaxage, la puissance consommée par le malaxeur est enregistrée à l'aide d'un wattmètre différentiel. Enfin, une attention particulière est accordée à l'échantillonnage.

:

Matériel d'essai

Fabrication du béton

L'expérimentation est réalisée à la station d'étude du malaxage du LCPC, à Nantes. Il s'agit d'une installation de taille industrielle capable de fabriquer en discontinu des gâchées d'un mètre cube. Pour cela, elle est équipée :

- d'une bascule à granulats de portée 2500 kg et d'échelon 5kg
- d'une bascule à ciment de portée 500 kg et d'échelon 1kg
- d'une bascule à eau de portée 250 kg et d'échelon 1kg.

Il est à noter que la centrale est équipée de doseurs conçus pour fonctionner en cycle continu, donc équipés d'extracteurs à bande.

Le malaxeur d'un mètre cube est amovible. Pour cette expérimentation, nous avons utilisé deux malaxeurs :

- un malaxeur annulaire PATAUD Mecamax 1500. Il s'agit d'un turbo malaxeur à axe vertical de capacité 1000 litres de béton vibré équipé de huit bras y compris racleur, et d'un moteur de 37 kW dont la vitesse de rotation est de 25 t/mn.
- Un malaxeur annulaire LIEBHERR RIM D 1,0. Il s'agit d'un malaxeur à axe vertical de capacité 1000 litres de béton vibré à cinq bras et deux tourbillons à entraînement mécanique. La puissance du moteur est de 45 kW et sa vitesse de rotation de 22,7 t/mn.

Matériels d'essai

La station d'étude du malaxage est en équipée d'un transducteur de mesure (wattmètre) à technologie numérique. Il s'agit d'un boîtier qui convertit les grandeurs électriques en sorties analogiques (mA ou V) puis les numérise. Dans le cas qui concerne cette expérimentation, le boîtier reçoit en entrées la tension sur les trois phases et l'intensité sur deux phases, et envoie en sorties analogiques les puissances active, réactive et apparente (P,Q,S).

¹ Les essais de perméabilité sont réalisés à l'IUT de Saint-Nazaire et font l'objet d'une commande séparée du projet national BAP.

Enfin, la station d'étude du malaxage est équipée d'un **préleveur automatique** pendulaire de 75 mm de largeur, qui permet d'effectuer des prélèvements de béton frais sans intervention directe d'un opérateur.

Les **autres matériels d'essais** utilisés sont les suivants :

- un cône d'Abrams pour l'essai d'étalement sur tôle inox ;
- une boîte en L en contreplaqué revêtu ;
- un tamis de maille 10 mm et balance de portée 151 kg et d'échelon 10 g pour l'essai de stabilité au tamis ;
- un rhéomètre BTRHEOM ,
- un aéromètre à béton de 5,2 l et une balance de portée 35 kg et d'échelon 1 g pour mesure de l'air occlus et de la masse volumique ;
- un micro-ondes de puissance 1,1kW restitué et une balance de portée 16,5 kg et d'échelon 1 g pour les mesures de teneur en eau ;
- un thermomètre électronique à sonde (-50°C à 250°C) pour mesure de la température de béton ;
- des moules carton 11x22 pour confection des éprouvettes de compression et de perméabilité ;
- une salle contrôlée en température (20°C) et en hygrométrie (50%) pour la première journée de conservation ;
- une piscine contrôlée en température (20°C) pour le restant de la conservation des éprouvettes de compression et de perméabilité ;
- une boîte à sable MLPC pour le surfacage des éprouvettes ;
- une machine hydraulique pour essai de compression jusqu'à 3000 kN .

En complément, l'IUT de St Nazaire effectue les essais de perméabilité (qui font l'objet d'une autre commande).

Matériaux utilisés

La formule fabriquée est une formule retenue par le projet national qui utilise les matériaux suivants :

- ciment CEM I 52.5 CE CP2 NF
- filler calcaire
- sable 0/4 roulé
- gravillon 4/12.5 roulé
- superplastifiant (éther poly carboxylique modifié)
- agent de viscosité (suspension siliceuse)

Protocole de fabrication

Conditions ayant conduit au choix du protocole

L'objectif de l'expérimentation étant d'étudier l'influence du temps de malaxage et du type de malaxeur sur les caractéristiques d'un béton auto-plaçant à l'état frais et durci, il était nécessaire de limiter au maximum les autres facteurs de variation et donc de fabriquer des bétons très proches (en termes de composition), si ce n'est strictement identiques.

Les conditions de réussites identifiées pour parvenir à un tel objectif étaient les suivantes :

- éviter d'utiliser des constituants dont l'état initial serait différent en :
 - fabriquant les différentes gâchées dans des conditions atmosphériques proches
 - laissant peu de temps entre deux fabrication
 - utilisant des matériaux ayant une humidité initiale peu variable
- maîtriser le plus possible la quantité d'eau dans la gâchée
- évaluer les erreurs commises sur cette quantité d'eau pour permettre l'interprétation des résultats
- figer le protocole.

Les essais devant concerner deux malaxeurs différents, l'expérimentation s'est donc réalisée en deux phases espacées de trois semaines, nécessaires au changement de malaxeur. Les conditions de réussites pouvaient être entièrement réunies pour chacune des phases mais ne pouvaient l'être que partiellement sur l'ensemble de la campagne.

Description du protocole utilisé

Pour toutes les gâchées, le protocole de fabrication est décrit ci-dessus :

- prélèvement d'environ 1 kg de gravillons à la base de la trémie de stockage (extracteur à bande) ;
- mesure de la teneur en eau de l'échantillon à l'aide d'un four micro-ondes. Le matériau est séché 10 minutes puis par séquence de deux minutes supplémentaires si la variation de poids est supérieur à 0,5 g (norme NFP-94 049-1 [6]) ;
- prise en compte de cette teneur en eau pour le lancement ultérieur de la gâchée à venir ;
- alimentation du malaxeur en sable humide ;
- homogénéisation du sable dans le malaxeur pendant au moins 60 secondes ;
- aussitôt après l'arrêt du malaxeur, prélèvement de 2 échantillons de sable d'au moins 1 kg chacun dans le malaxeur à deux endroits différents et sur une tranche verticale complète (c'est à dire en allant jusqu'au fond du malaxeur) ;
- mesure de la teneur en eau des deux échantillons à l'aide d'un four à micro-ondes. Le matériau est séché 10 minutes puis par séquence de deux minutes supplémentaires si la variation de poids est supérieur à 0.5 g (norme NFP-94 049-1 [6]) ;
- en fonction de la moyenne des deux teneurs en eau obtenues, calcul du sable et de l'eau réellement présents dans le malaxeur.
- ajout du sable sec manquant (ce sable a été préalablement séché en étuve) directement dans le malaxeur ;
- introduction manuelle du filler dans le malaxeur ;
- lancement du reste du cycle selon la séquence d'introduction suivante :
 - introduction des gravillons en 10 s
 - puis introduction du ciment en 6 s
 - puis introduction de l'eau à laquelle sont mélangés les deux adjuvants en 13 à 14 s.
- Pendant l'exécution du cycle, notation des pesées des balances sur feuilles d'essais pour prendre en compte les éventuelles erreurs notamment en ce qui concerne l'eau ;
- malaxage 20, 38, 70, ou 300 secondes selon le cas après la fin de l'introduction de l'eau ;
- vidange de la gâchée sur le tapis échantillonneur et prélèvement à l'aide du préleveur selon le plan d'échantillonnage ;
- lorsque tous les échantillons de béton sont prélevés, un nouveau prélèvement de gravillons est effectué à la base de la trémie pour recalculer une teneur en eau. Celle-ci sera utilisée pour, d'une part, évaluer l'éventuelle erreur commise sur les gravillons utilisés dans la gâchée précédente et, d'autre part, comme teneur en eau des gravillons pour la gâchée suivante (sauf si la gâchée suivante est faite le lendemain).

L'eau superficielle des matériaux a tendance à percoler vers la base des trémies de la centrale, ce qui entraîne une teneur en eau à cet endroit beaucoup plus élevée. Pour pallier ce phénomène, lors de la première gâchée de la journée, les bases des trémies contenant le sable et le gravillon ont été vidangées pour éliminer les matériaux les plus humides.

Gâchées fabriquées

En tout, 10 gâchées ont été fabriquées : six avec le malaxeur Liebherr et quatre avec le malaxeur Pataud (L = Liebherr et P = Pataud).

- **Gâchée 0L**, formule de référence industrielle, refusée pour étalement insuffisant. Suite à cette fabrication, il a été décidé d'ajouter 8 litres d'eau supplémentaire pour la gâchée suivante. Bien que refusée, la totalité des essais ont été effectués sur cette gâchée sauf les essais de durabilité (perméabilité) ;
- **gâchée 3Ljetée**, refusée pour étalement insuffisant. Bien qu'un problème ait été détecté sur la teneur en eau des gravillons, il a été décidé d'ajouter 4 litres d'eau supplémentaires pour les gâchées suivantes ;
- **gâchées 1L, 2L, 3L, 4L** (dans le malaxeur Liebherr) ;
- **gâchées 1P, 2P, 3P, 4P** (dans le malaxeur Pataud).

Au final, les gâchées d'étude ont 12 litres/m³ d'eau en plus par rapport à la formule de référence industrielle 0L.

Les temps de malaxage sont de :

- 20 s pour les gâchées 1L et 1P ;
- 38 s pour les gâchées 2L et 2P ;
- 70 s pour les gâchées 0L, 3L et 3P ;
- 300 s pour les gâchées 4L et 4P. ;

Déroulement des essais de caractérisation

Les essais de caractérisation du béton sont effectués aussitôt après les prélèvements, à proximité immédiate de la centrale, sauf pour la confection des éprouvettes qui a lieu dans le bâtiment voisin, dans une salle à 20 °C. Il est à noter que le premier essai réalisé est un essai d'étalement ayant également pour valeur l'acceptation ou non de la gâchée.

Rappel des essais de caractérisation

- 6 essais d'étalement
- 1 essai à la boîte en L
- 1 essai de stabilité au tamis
- 1 essai au rhéomètre selon le protocole suivant :
 - Remplissage par simple déversement dans la gamelle
 - 6 points de mesure entre 0,8 et 1 tr/s
 - répétition du même protocole 20 mn plus tard sur le même échantillon.
- 1 mesure d'air occlus ;
- 1 mesure de masse volumique à l'aide du bol de l'aéromètre ;
- 1 mesure de la température du béton ;
- 15 essais de compression sur éprouvettes 11x22 à 27 jours.

Plan d'échantillonnage

Pour les prélèvements, on procède comme suit :

- à la fin du temps de malaxage prévu, la gâchée est vidangée sur un tapis « échantillonneur » à vitesse variable qui permet de répartir le béton en une veine d'épaisseur relativement constante ;
- lorsque la gâchée est totalement vidangée, le tapis est arrêté ;
- les prélèvements sont alors effectués à partir du poste de pilotage de la centrale, à l'aide du préleveur et selon un plan d'échantillonnage préalablement établi en concordance avec les essais à réaliser.

Nom gachée	Résultats industriels			Résultats LCPC			
	2m3	2m3	2m3	0L	3Ljetée	3L	3P
Malaxeur	20/12/00	20/12/00	20/12/00	Lie. DT Im3	Lie. DT Im3	Lie. DT Im3	Paraud Im3
Date	11h10	9h10	14h55	13h30	13h30	15h30	13h30
Heure				7.5°C	11°C	11°C	2°C
Température air	70 s	70 s	70 s	70 s	70 s	70 s	70 s
Temps de malaxage				5,32%	5,43%	5,09%	7,90%
Humidité du sable	Prélèvement 1			5,32%	4,91%	4,98%	7,97%
	Prélèvement 2			5,32%	5,17%	5,04%	7,94%
	Moyenne			2,96%	2,76%	1,66%	1,70%
Humidité des gravillons	Avant fabrication			2,96%	1,66%	2%	1,45%
	Après fabrication			200 l/m ³	208 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³
Eau totale visée	200 l/m ³	190 l/m ³	215 l/m ³	+/- 0	-2 à -10 l/m ³	-1 à +2 l/m ³	0 à +2 l/m ³
Fourchette de fabrication	9,3%	8,8%	10,0%	9,3 / 9,3 %	9,2 / 9,6 %	9,8 / 9,9 %	9,9 / 9,9 %
Teneur en eau théorique fourchette basse / haute				9,2°C		12,5°C	7,1°C
Température béton	65,5	65,5	65	54,5	46	63,7	61,8
Etallement en cm	Moyenne			3,4		3,6	4,7
	Ecart type			1,65%		1,50%	3%
Teneur en air	0,40%	1,70%	0,40%	2402		2346	2354
Masse volumique sur bol 5.2 L. en kg/m3	2380	2350	2400	9,40%	9,30%	9,28%	9,10%
Teneur en eau sur béton	7,90%	7,40%	8,80%	14		10	12,5
Boite en L	H1 en cm	9,5	10	18,2		8,2	7,5
	H2 en cm	8,5	8	2,2	6,5		1,80%
Stabilité au tamis	% laitance	13,30%	4,10%	46,20%	0,81%	4,26%	289 / 291
Rhéomètre à to / to + 20 mn	Seuil en Pa			178 / 162		169 / 139	107 / 116
Résistance à 27 j en Mpa	Viscosité Pa/s			91 / 103		47,78	47,77
	Moyenne	45,05*		48,78		1,39	1,62
	Ecart type			1,88			

Tableau 1. résultats d'essais réalisés par la l'industrielle par le LCPC sur des fabrication avec 70 secondes de malaxage
* Les résistances obtenues par la société propriétaire sont sur 3 éprouvettes 16x32 à 28 jours

	Liebherr 1m ³				Pataud 1m ³			
	1L	2L	3L	4L	1P	2P	3P	4P
Nom gâchée	23/11/01	23/11/01	22/11/01	23/11/01	13/12/01	13/12/01	12/12/01	12/12/01
Date	13h00	14h50	15h30	9h30	10h45	14h30	13h30	15h30
Heure	10°C	10°C	11°C	8°C	4°C	5,5°C	2°C	3,5°C
Température air	20 s	38 s	70 s	300 s	20 s	38 s	70 s	300 s
Temps de malaxage	5,39%	5,17%	5,09%	5,34%	6,83%	6,49%	7,90%	6,49%
Humidité du sable	5,33%	5,19%	4,98%	5,33%	6,87%	6,60%	7,97%	6,56%
Prélèvement 1	1,87%	1,89%	1,66%	1,91%	1,49%	1,16%	1,70%	1,45%
Prélèvement 2	1,89%	1,70%	2%	1,87%	1,33%	1,45%	1%	1,50%
Humidité des gravillons	212 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³	212 l/m ³
Après fabrication	+/- 0 l/m ³	-1 à 0 l/m ³	-1 à +2 l/m ³	+/- 0	-1 à +1 l/m ³	+1 à +4 l/m ³	0 à +2 l/m ³	+1 à +2 l/m ³
Eau totale visée	9,9 / 9,9 %	9,8 / 9,9%	9,8 / 9,9%	9,9 / 9,9%	9,8 / 9,9%	9,9 / 10,0%	9,9 / 9,9%	9,9 / 9,9%
Fourchette de fabrication	13°C	13°C	12,5°C	11,8°C	7,5°C	8,9°C	7,1°C	8,3°C
Teneur en eau théorique fourchette basse / haute	63,75	63,4	63,7	65,4	57,2	62,9	61,8	66,8
Température béton	4,1	4,1	3,6	0,9	7,5	3,9	4,7	1,6
Étalement (cm)	1,70%	1,40%	1,50%	2%	2,0%	2,3%	2,5%	3,2%
Teneur en air	2370	2380	2346	2352	2358	2370	2354	2320
Masse volumique sur bol 5.2 L en kg/m ³	9,30%	9,30%	9,28%	9,80%	9,7%	9,5%	9,1%	10,0%
Teneur en eau sur béton	11	10,9	10	11,1	11,5	11	12,5	10,5
Boîte en L	8	7,8	8,2	7,9	7,4	7,7	7,5	8,4
Stabilité au tamis	2,14%	2,03%	4,26%	7,77%	1,90%	0,80%	1,80%	6,60%
Rhéomètre à To + 5 mn	191	302	169	242	225	172	289	285
Viscosité Pa/s	63	75	79	70	91	82	107	86
Rhéomètre à To + 25 mn	168	278	139	240	253	176	291	306
Viscosité Pa/s	71	85	106	94	87	85	116	79
Résistance à 27 j en MPa	47,04	48,25	47,78	48,54	45,05	46,3	47,77	46,79
Ecart type	1,19	1,79	1,39	1,67	1,79	1,66	1,62	0,96

Tableau 2. Résultats d'essais sur les huit gâchées de l'étude

Le plan d'échantillonnage est le même pour les huit fabrications :

- 48 prélèvements de 3 à 4 litres sont fait, 1 à 48 à partir du matériau sortie en début de la vidange ;
- entre deux prélèvements successifs, la veine de béton est déplacée d'environ 6 à 10 litres ;
- 18 échantillons sont constitués d'un seul prélèvement. Il sont utilisés pour la confection d'éprouvettes 11x22, dont 15 sont réservées aux essais de résistance en compression (prélèvements 4, 5, 6, 7, 20,21,22,23, 30,31 et 32), les 3 autres aux essais de perméabilité (prélèvements 11,12 et 13) ;
- 10 échantillons sont constitués de trois prélèvements successifs ; ils sont utilisés pour six essais d'étalement (prélèvements 1 à 3, 17 à 19, 24 à 26, 40 à 42, 43 à 45, 46 à 48), un essai au BTRHEOM (prélèvements 8 à 10), un essai de stabilité au tamis (prélèvements 14 à 16), un essai de boîte en L (prélèvements 27 à 29), un essai d'air occlus (prélèvements 40 à 42).

Remarque : Il n'y a pas de prélèvements sur 300 à 400 litres de la fin de la vidange.

Présentation des résultats

Conditions de l'expérimentation

L'ensemble des résultats est récapitulé dans les tableaux 1 et 2. Le tableau 1 permet de comparer les résultats d'essais réalisés par la société propriétaire de la formule (turbo malaxeur à axe vertical de capacité 1000 litres de béton vibré de 2 m³) et ceux obtenus par le LCPC (0L, 3Ljetée 3L et 3P). Tous ces fabrications sont réalisées au même temps de malaxage.

Le tableau 2 permet de comparer les résultats obtenus sur les huit gâchées de l'étude (1P, 2P, 3P, 4P, 1L, 2L, 3L et 4L).

Les fabrications ont été réalisées à des températures atmosphériques basses : 8 à 10°C pour le malaxeur Liebherr, 2 à 6°C pour le malaxeur Pataud. Le problème pourrait avoir son importance pour les bétons fabriqués avec le malaxeur Pataud, puisque la température de ces bétons est inférieure à 10°C. Pour le malaxeur Liebherr, la température des bétons est légèrement supérieure à 10°C.

L'humidité initiale du sable varie peu pour les fabrications sur un même malaxeur. Elle se situe entre 5 et 5,4 % pour le malaxeur Liebherr et entre 6,5 et 8 % pour le malaxeur Pataud. L'humidité initiale des gravillons est elle relativement constante pour toutes les fabrications : mesures entre 1 et 2 %, légèrement plus élevées pour le malaxeur Liebherr. A partir de mesures de la teneur en eau des gravillons (à la sortie de la trémie, après la fabrication) et du pesage de la bascule à eau, nous estimons (comme expliqué précédemment) l'erreur sur le dosage en eau dans le malaxeur, pour chaque fabrication. Nous nous situons dans une fourchette de -1 à +2 litres/m³, avec une exception : la gâchée 2P où l'erreur pourrait attendre +4 litres/m³. Nous estimons donc qu'à l'exception de la fabrication 2P en ce que concerne le dosage en eau, les fabrications d'étude sont réalisées avec une répétabilité de conditions initiales tout à fait satisfaisantes.

Mesures de puissance

Les figures 1 et 2 représentent l'évolution des puissances consommées lors du malaxage pour le 10 fabrications réalisées. Le début de ces courbes (à partir de -40 s) correspond à la puissance de malaxage avec le sable introduit dans le malaxeur. Au fur et à mesure de l'introduction d'autres constituants, la puissance de malaxage augmente. Au temps de malaxage 0 s, tous les constituants (en incluant les constituants liquides) sont dans le malaxeur. La puissance commence à décroître pour évoluer vers un palier. La chute brutale de la puissance consommée correspond pour chaque fabrication à la vidange du malaxeur. Le béton est étalé sur le tapis échantillonneur en 20 secondes environ.

Pour les huit fabrications d'étude, on constate une très bonne répétabilité des courbes de puissance pour un même type de malaxeur, à l'exception notable de la fabrication 2P pour laquelle on observe sur la partie montante un retard de 10 secondes sur l'introduction des gravillons dans le malaxeur et sur la partie descendante l'effet d'un dosage en eau plus important (entre 1 et 4 l/m³ en plus).

Pour la fabrication 0L, on remarque l'effet d'une différence de dosage en eau (-12 l/m³) sur le palier de la courbe de puissance. Le même constat pourrait être fait pour la fabrication 3Ljetée. En effet, cette gâchée contenait probablement 14 l/m³ d'eau en moins, par rapport à la composition nominale.

Finalement, on vérifie que, pour une procédure de malaxage fixé, le palier de la puissance de malaxage est un indicateur pertinent du dosage en eau dans le malaxeur, quand celui-ci est le seul paramètre qui change.

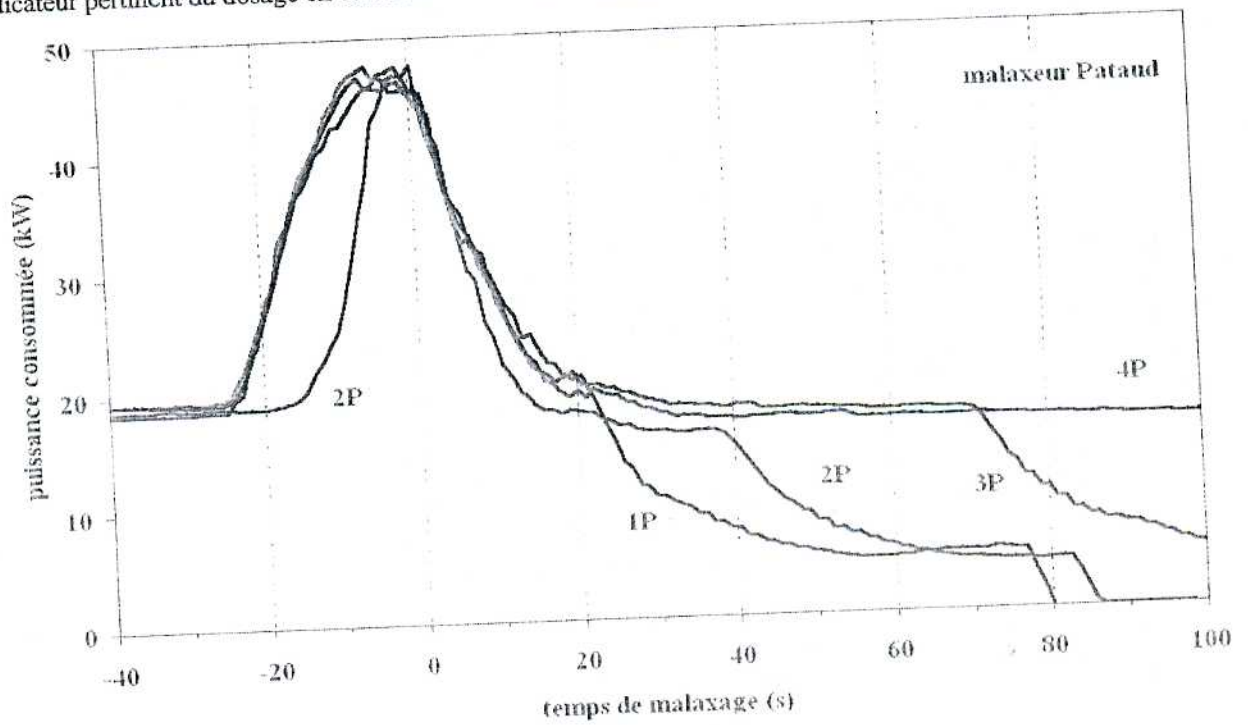


Figure 1. Courbes de puissance consommée pour les quatre fabrications en malaxeur Pataud 1P, 2P, 3P, 4P

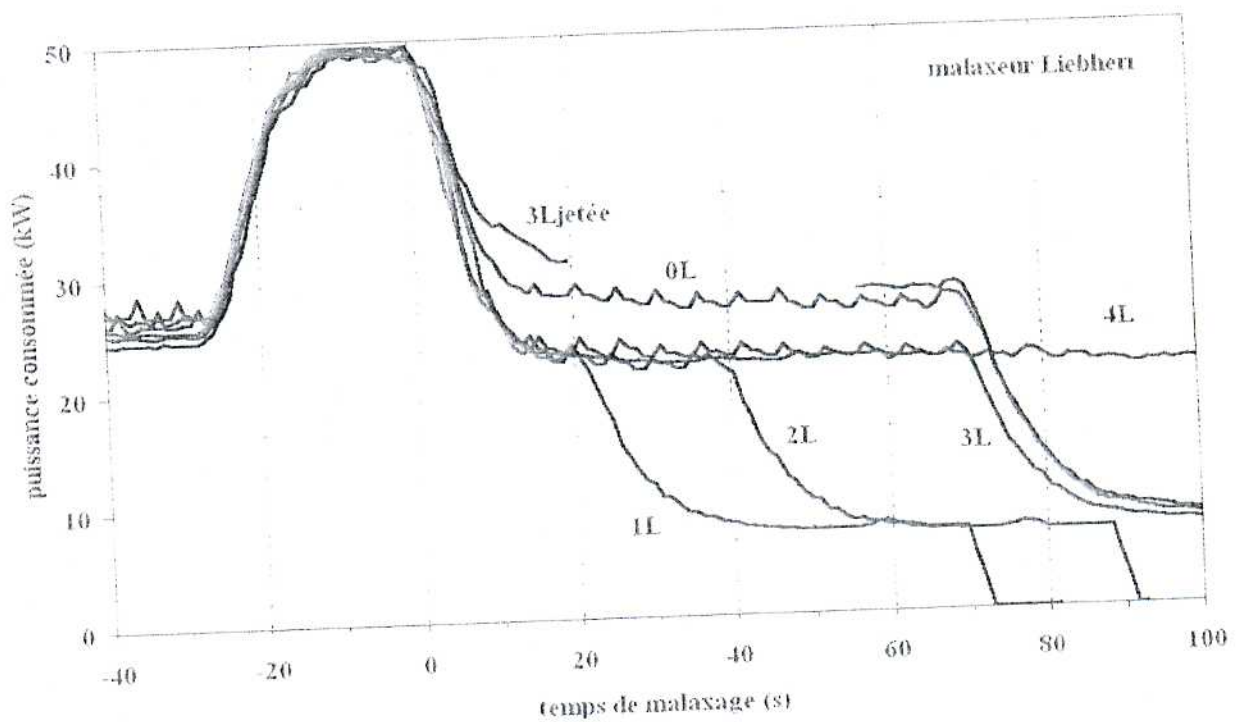


Figure 2. Courbes de puissance consommée pour les fabrications en malaxeur Liebherr 0L, 1L, 2L, 3L, 4L et 3Ljété

Essais d'étalement

On représente dans la figure 3 l'étalement moyen dans la gâchée des bétons obtenus lors de huit fabrications d'étude. L'étalement moyen est calculé sur 6 échantillons. Le critère d'acceptation du béton étant un étalement de 60 cm, on remarque que cet objectif peut être atteint rapidement (à 20 s de malaxage après la fin d'introduction de tous les constituants) pour le malaxeur Liebherr. Dans le malaxeur Pataud, le temps de malaxage nécessaire (après l'introduction des constituants) est plus long (entre 1 et 2 minutes). Pour obtenir des performances du béton produites similaires au malaxeur Liebherr à 20 secondes de malaxage, on pourrait estimer que le temps de malaxage nécessaire en malaxeur Pataud est de l'ordre à 100 secondes. Strictement la même conclusion est obtenue si on regarde l'évolution de l'hétérogénéité de l'étalement béton dans la gâchée avec le temps de malaxage (figure 4 – coefficient de variation sur les 6 échantillons).

Dans cette analyse, on fait abstraction de la fabrication 2P. Nous avons déjà signalé que lors de cette fabrication, le dosage en eau est plus élevé. Le coefficient de variation des mesures d'étalement sur le béton 0L sont du même ordre de grandeur que celles des bétons malaxés 70 secondes (en malaxeur Liebherr et Pataud).

L'étalement moyen sur le béton 0L est de 54,5 cm. Cette valeur est cohérente avec un sous-dosage en eau par rapport à la formule d'étude (3L – étalement moyen de 63,7 cm).

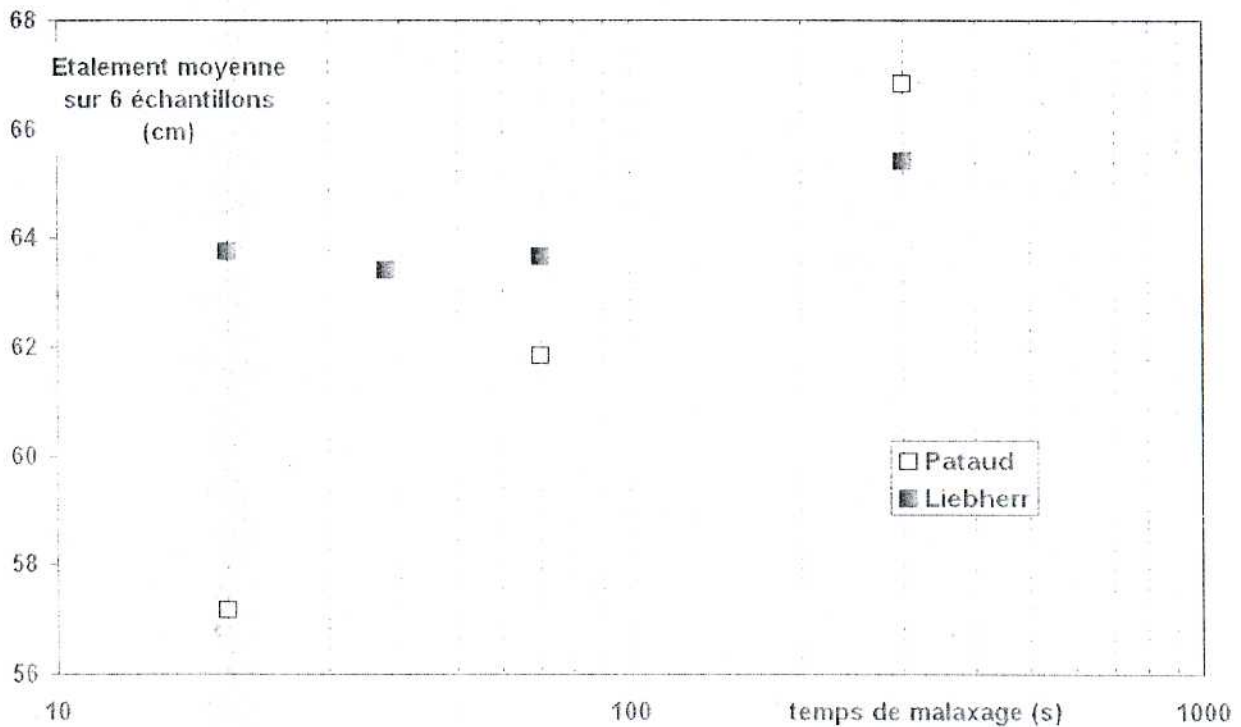


Figure 3. Etalement (moyenne sur 6 échantillons)

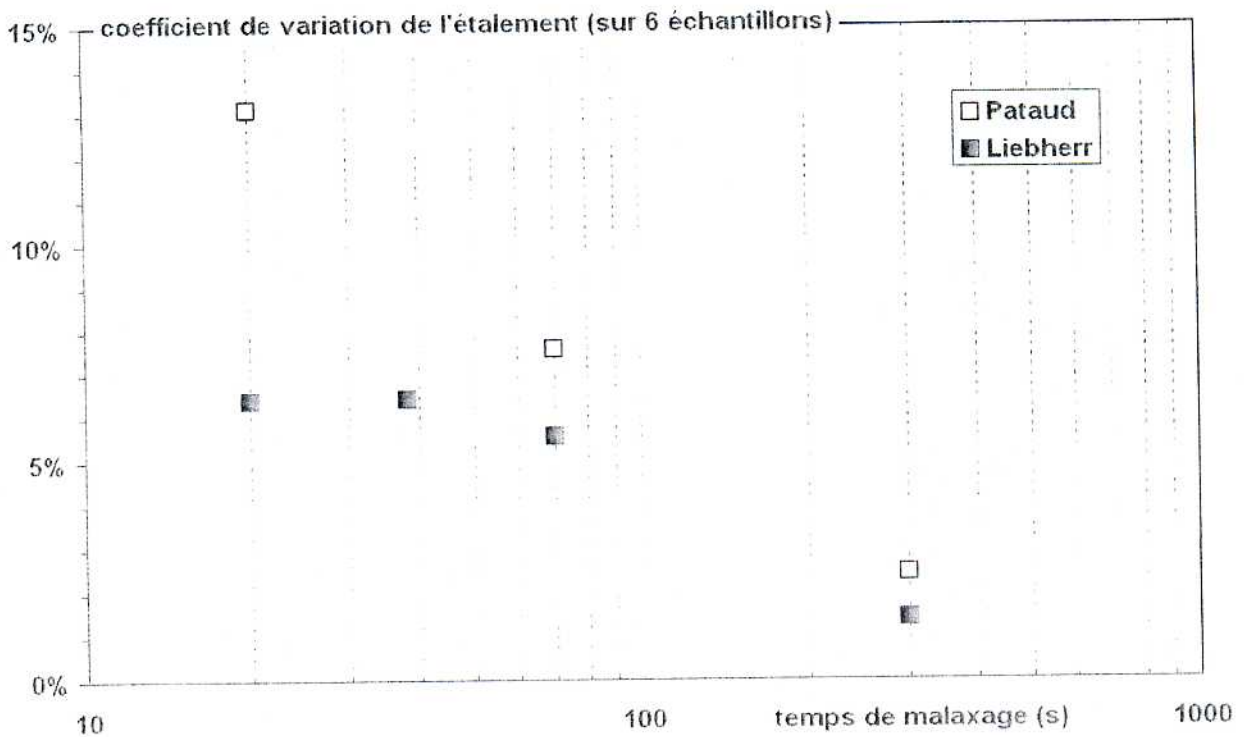


Figure 4. Etalement (coefficient de variation sur 6 échantillons)

Pour comprendre l'origine de cette hétérogénéité, on représente figure 5 la mesure de l'étalement dans la gâchée en fonction de la position de l'échantillon mesuré sur le tapis échantillonneur. Entre le béton sorti du malaxeur en début de vidange (prélèvement 1) et celui à deux tiers de la vidange (prélèvement 48), on estime qu'il existe une différence de 10 à 12 secondes en termes de temps de malaxage. On remarque aisément que, entre le début et la fin de la gâchée, le béton est de plus en plus fluide (Figure 5). Cette évolution va dans le sens de l'effet d'un malaxage supplémentaire pour la fin de la gâchée. Plus le temps de malaxage est court, plus cet effet se fait ressentir. Au temps de malaxage très long (300 secondes) il n'y a pas de différence d'étalement entre le début et la fin de la gâchée.

Toutefois, l'effet seul d'un surplus de malaxage ne pourrait pas expliquer l'évolution de l'étalement dans la gâchée. En effet, les derniers mesures d'étalement dans une gâchée correspondent à au plus 10 s de malaxage supplémentaire par rapport aux premières mesures d'étalement dans la même gâchée. Or les derniers étalement à 20 et 38 s de malaxage sont systématiquement supérieurs aux premiers étalements à 38 et 70 s respectivement (sur le même type de malaxeur).

Une ségrégation du béton lors de la vidange (granulat grossier en début de vidange ?!) pourrait être envisagée. Si cette ségrégation existe, elle est favorisée par un temps de malaxage court. Dans la figure 5 nous avons représenté (BAP Nantes) des résultats obtenus lors de la thèse de David CHOPIN [3] sur deux formules de béton autoplaçant. Les tendances décrites ci-dessus semblent également respectées.

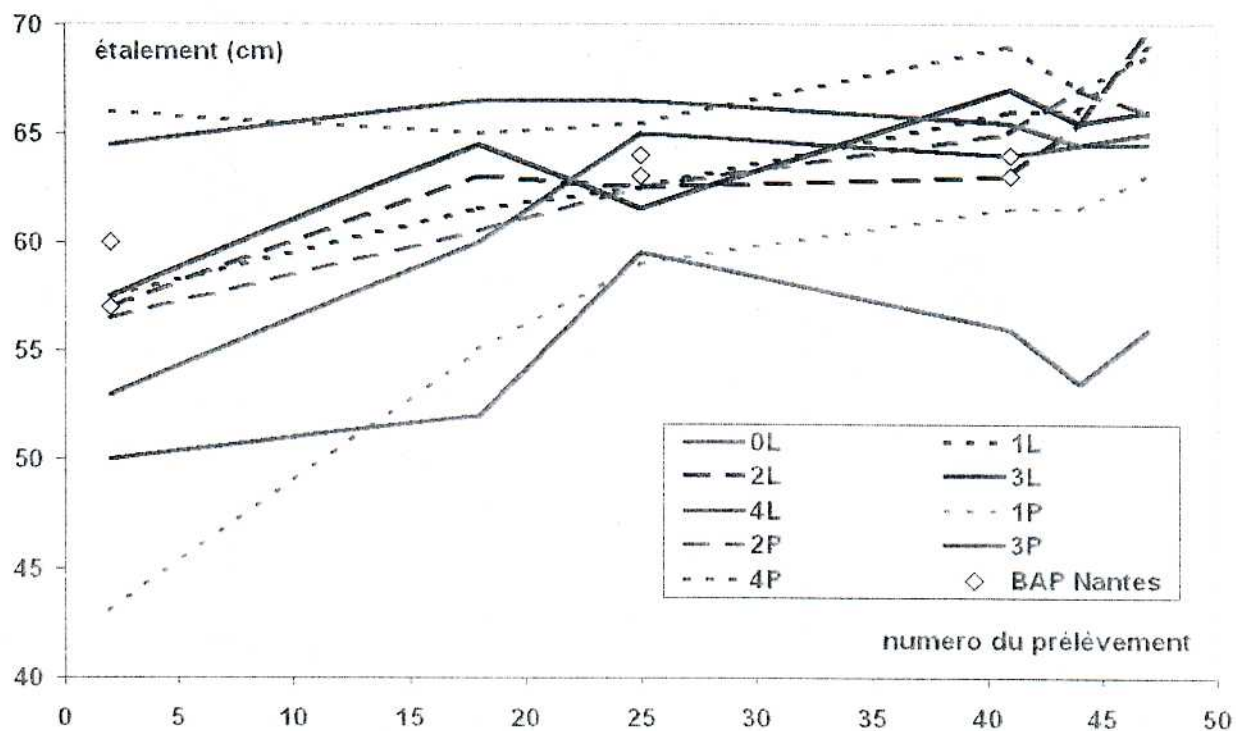


Figure 5. Evolution de l'étalement du béton sortie en début jusqu'à la fin de la vidange

Les effets cumulés du temps de malaxage sur la puissance de malaxage sont analysés dans la figure 6. On représente l'étalement du premier échantillon sorti du malaxeur et la puissance consommée par le malaxeur juste avant la vidange.

On observe une relation linéaire entre ces deux grandeurs pour un malaxeur donné. Il est à remarquer que cette relation semble être valable à la fois pour une évolution de la fluidité du béton suite à un temps de malaxage plus ou moins long et pour l'évolution de la fluidité du béton suite à un dosage en eau plus ou moins élevé. En effet, pour les fabrications 3L jetée et 0L le dosage en eau est différent de celui des fabrications 1L, 2L, 3L et 4L. Aussi, la fabrication 2P pour laquelle on a déjà signalé un surdosage d'eau, s'inscrit bien dans la tendance des fabrications 1P, 2P et 4P. Ceci confirme que la puissance en fin de malaxage, comme l'étalement, sont deux grandeurs technologiques contrôlées par la rhéologie du béton frais.

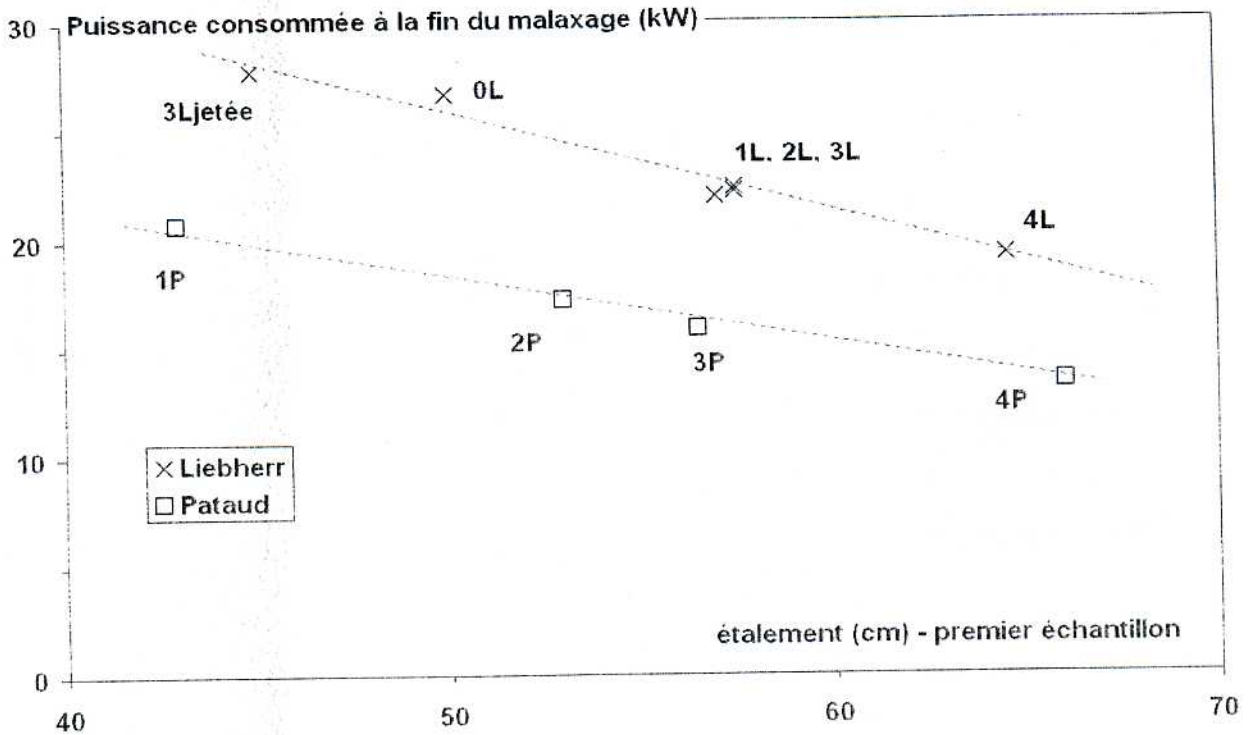


Figure 6. Relation puissance consommée vs. Étalement.

Autres essais sur béton frais

Les teneurs en air (tableaux 1 et 2) sur les neuf bétons mesurés montrent des valeurs très proches pour un malaxeur donné. Pour les fabrications en malaxeur Liebherr ces valeurs (1,4 à 2%) sont légèrement supérieures à celles obtenues pour les fabrications en malaxeur Pataud. Une explication pourrait être le type de malaxage (les tourbillons entraînant plus d'air que les pales classiques) mais la différence de température du béton est à prendre en considération. Pour les deux types de malaxeur, on constate une augmentation de la teneur en air pour les temps de malaxage très longs (5 minutes).

Le coefficient de variation des mesures de masse volumique sur les huit fabrications d'étude est de 0,8 %. Si on tient compte de la teneur en air et des écarts de dosage en eau estimés, le coefficient de variation devient 0,6 %. Il inclut cette fois la fabrication de référence 0L. Il s'agit donc de la précision de l'essai. Effectivement, il n'y a pas de raison que le temps de malaxage et le type de malaxeur influent sur la masse volumique corrigée.

La mesure de teneur en eau sur le béton réalisée au four micro-ondes, sur un échantillon d'environ 1 kg, donne des résultats moins précis. Le résultat de la méthode n'est cependant pas aléatoire : on obtient en moyenne 0,35 points (% de teneur en eau) de moins que la teneur en eau supposée du béton, calculée à partir des mesures sur les granulats et des pesées de l'eau ajoutée. L'écart type de la méthode est de 0,35 points, ce qui correspond à un coefficient de variation d'environ 3,5 %. Pour notre formule de béton autoplaçant, cette imprécision correspond à un écart type de la méthode de 7 l/m^3 . Cela donne un intervalle de confiance d'environ 15 l/m^3 , ce qui disqualifie la méthode dans le cas des BAP, pour lesquels on recherche une précision de dosage de l'ordre de 5 l/m^3 . Toutefois une recherche plus approfondie serait nécessaire avant de conclure sur cet aspect.

Pour l'analyse de la rhéologie du béton et compte tenu de la précision de mesure du seuil et de la viscosité du BTRHEOM (coefficients de variation de l'ordre de 20% sur nos essais), il n'y a pas d'évolution remarquée avec le temps de malaxage et avec le type de malaxage (figures 7 et 8). L'essai a été répété une deuxième fois 20 minutes après la première mesure de rhéologie sur le même échantillon, pour toutes les fabrications. On constate qu'il ne semble pas y avoir d'influences détectables sur la rhéologie du béton entre la première et la deuxième mesure. Il semble que l'évolution de l'étalement entre le début et la fin de la gâchée ne soit pas liée à un effet de vieillissement lié à l'hydratation du ciment (la première mesure est faite simultanément au premier essai d'étalement, la deuxième mesure de rhéologie est réalisée environ au moment du quatrième essai d'étalement).

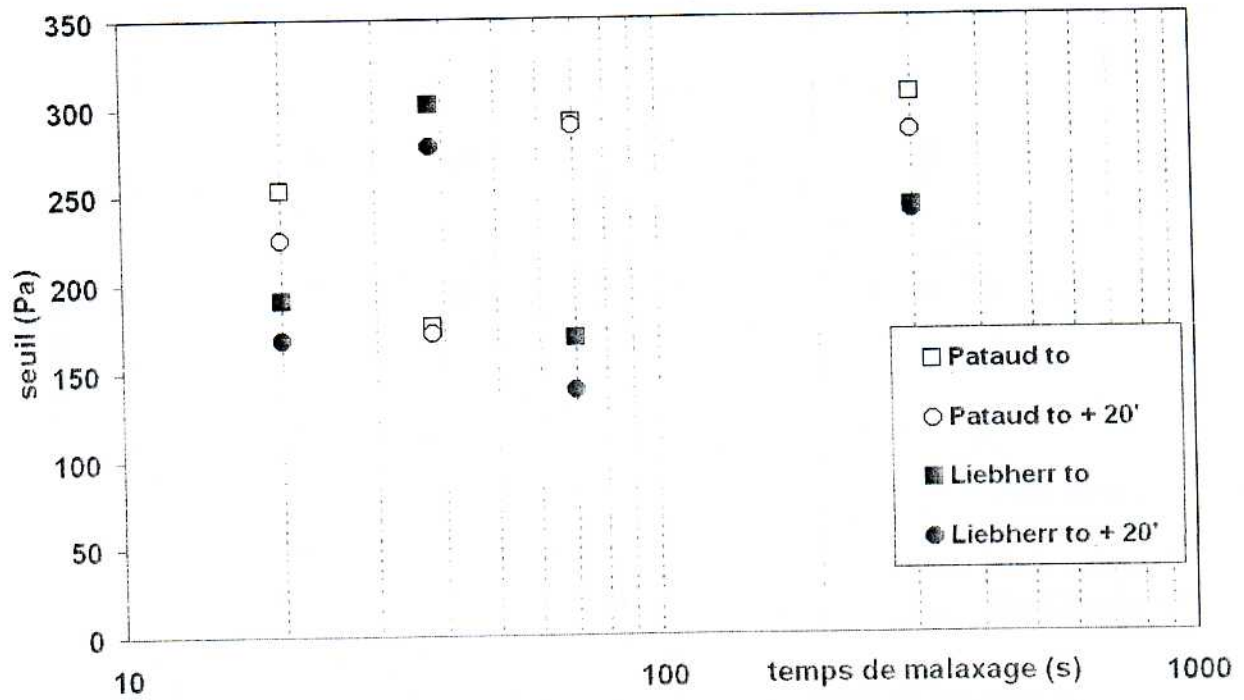


Figure 7. seuil mesuré au BTRHEOM pour les essais 1L, 2L, 3L, 4L et 1P, 2P, 3P, 4P

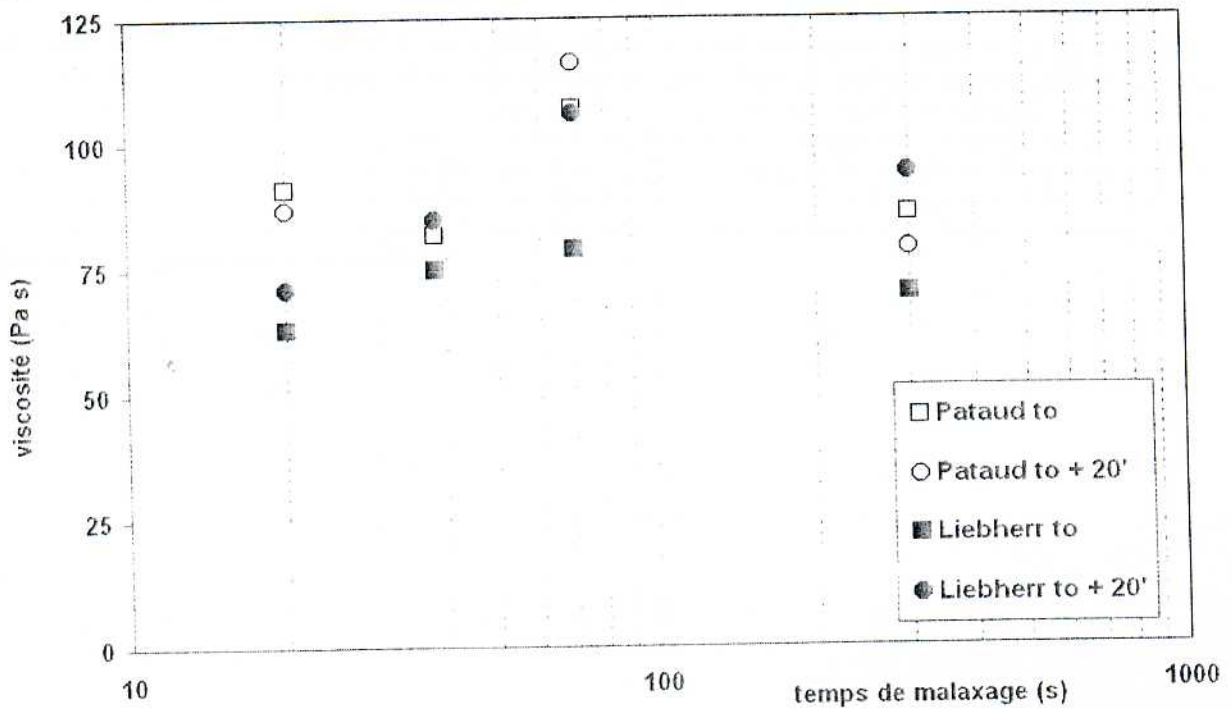


Figure 8. viscosité mesurée au BTRHEOM pour les essais 1L, 2L, 3L, 4L et 1P, 2P, 3P, 4P

Comme pour l'essai de rhéométrie, la boîte en L ne semble pas montrer d'évolution du matériau produit avec le temps de malaxage et le type de malaxeur (figure 9).

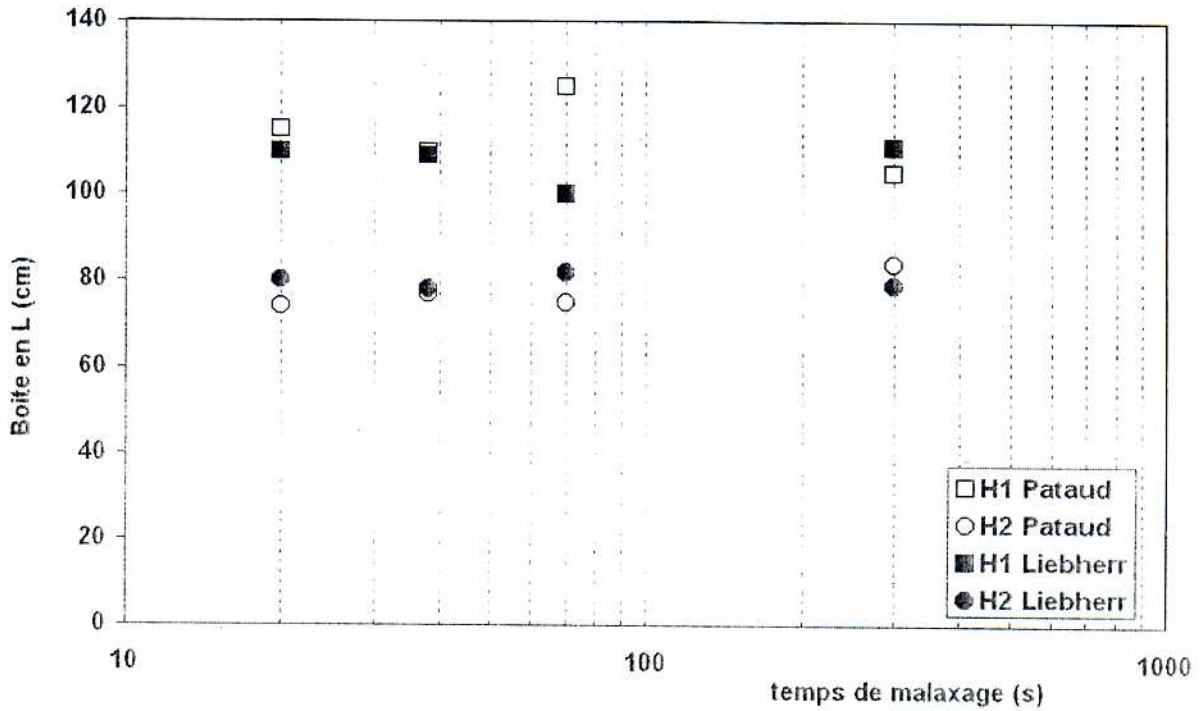


Figure 9. Boite en L pour les essais 1L, 2L, 3L, 4L et 1P, 2P, 3P, 4P

Enfin, parmi les essais de caractérisation d'un béton autoplaçant, celui qui semble le plus sensible à l'évolution du béton avec le temps de malaxage et au type de malaxeur est l'essai de stabilité au tamis (figure 10). On remarque que les temps de malaxage longs favorise une perte de stabilité (ségréabilité de la pâte). On constate également que le malaxeur Liebherr produit à tous les temps de malaxage un béton moins stable que le malaxeur Pataud aux mêmes temps de malaxage. Cependant, pour le béton autoplaçant de nos essais, nous sommes dans tous les cas bien en-dessous de la limite d'acceptabilité du produit (15 %), c'est à dire que tous les bétons sont acceptables sous l'angle de la ségrégation statique. Le béton 0L, qui contient moins d'eau, est beaucoup plus stable (ce qui est cohérent avec la théorie).

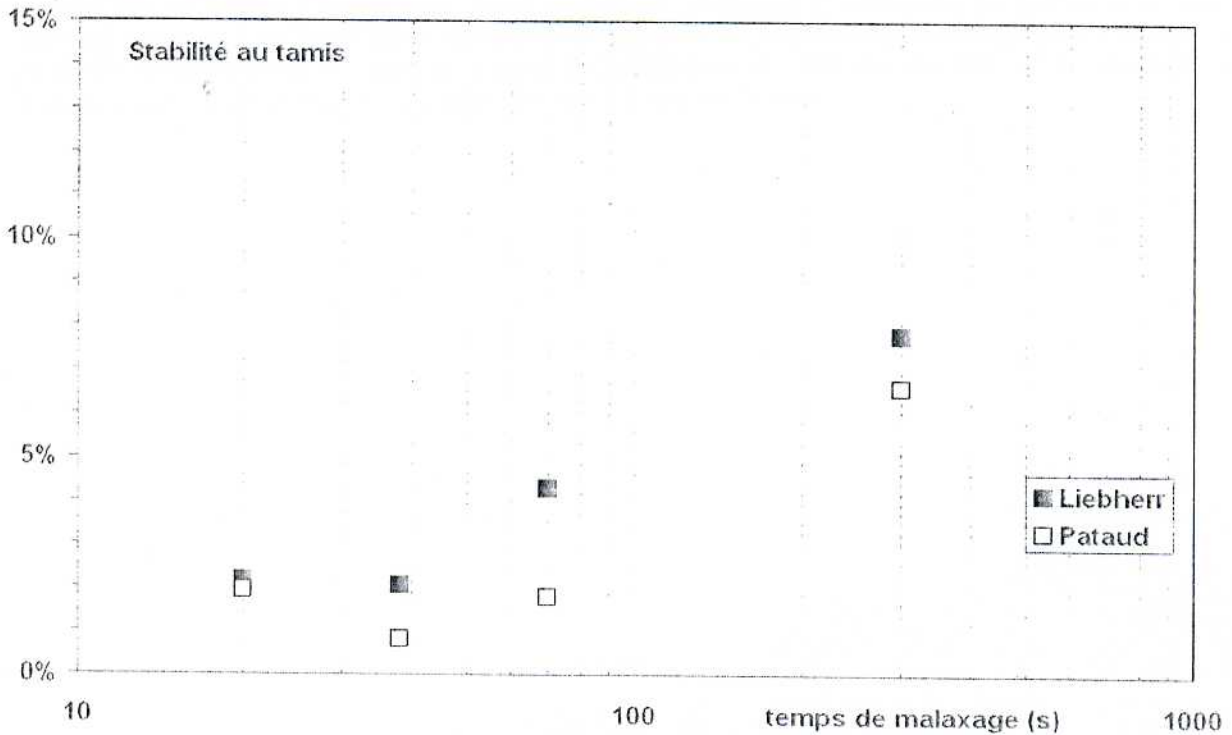


Figure 10. Stabilité au tamis pour les essais 1L, 2L, 3L, 4L et 1P, 2P, 3P, 4P

Essais de résistance en compression

L'analyse de la résistance en compression dans la gâchée (moyenne sur 15 échantillons - figure 11) montre que l'évolution de la résistance en compression avec le temps de malaxage est plus rapide pour le malaxeur Liebherr que pour le malaxeur Pataud. Pour les deux malaxeurs, le temps de malaxage très long (5 minutes) n'apporte pas de gain supplémentaire de résistance en compression.

Pour mieux comparer les évolutions de la résistance en compression (évolution du dosage en eau et la teneur en air mises à part) nous avons représenté figure 12, les valeurs corrigées (par la formule de Féret) ajustées à un béton équivalent avec un dosage en eau de 212 l/m^3 et une teneur en air de 1,5%. On observe cette fois-ci que des résistances corrigées plus hautes sont obtenues sur le malaxeur Pataud. Ce constat est à relativiser puisqu'il ne tient pas compte de la teneur en air systématiquement plus élevée de ces bétons. La résistance en compression corrigée évolue avec le temps de malaxage pour le malaxeur Pataud alors qu'elle se stabilise très vite pour le malaxeur Liebherr. Là encore, pour les deux malaxeurs, le temps de malaxage très long (5 minutes) n'apporte pas de gain de résistance en compression.

La résistance en compression corrigée du béton 0L est inférieure à celle du béton 3L (même temps de malaxage, même malaxeur, dosage en eau différent). En effet, le béton 0L n'est pas tout à fait un béton autoplaçant. La mise en œuvre des éprouvettes sans vibration a probablement été défavorable par rapport à la même mise en œuvre sur le béton autoplaçant 3L (teneur en air supplémentaire lors de la mise en œuvre).

Les valeurs représentées figures 11 et 12 sont déterminées avec une précision de $\pm 0,6 \text{ MPa}$ (1,65 fois l'écart type).

Le malaxeur Pataud conduit à une évolution lente du matériau, visible aussi bien pour les résistances (et étalements) moyen(ne)s que pour leurs coefficients de variation respectifs (figure 13), alors que pour le malaxeur Liebherr, tout se passe très vite, et après 20 secondes on a des oscillations (compétition mélange - démélange ??), mais plus d'amélioration du béton.

Nous pouvons mieux distinguer une tendance sur l'évolution du coefficient de variation avec le temps de malaxage en ajoutant les résultats des fabrications réalisées lors de la thèse de David CHOPIN : BAP Nantes (2 formules, 4 temps de malaxage), BHP Nantes (2 formules, 4 temps de malaxage), BO (1 formule, 2 temps de malaxage) - figure 14. On constate que de manière globale le coefficient de variation diminue avec le logarithme du temps de malaxage. Cependant, la précision de l'essai et surtout de l'échantillonnage font que cette décroissance est difficile à mettre en évidence. En effet, le coefficient de variation a des valeurs entre 2 et 6% alors que la précision de l'essai est du même ordre de grandeur. On remarque également que pour les essais où le protocole de prélèvement n'a pas été respecté les coefficients de variation mesurés sur la résistance sont supérieurs à 8%. C'est probablement l'effet de l'erreur d'échantillonnage.

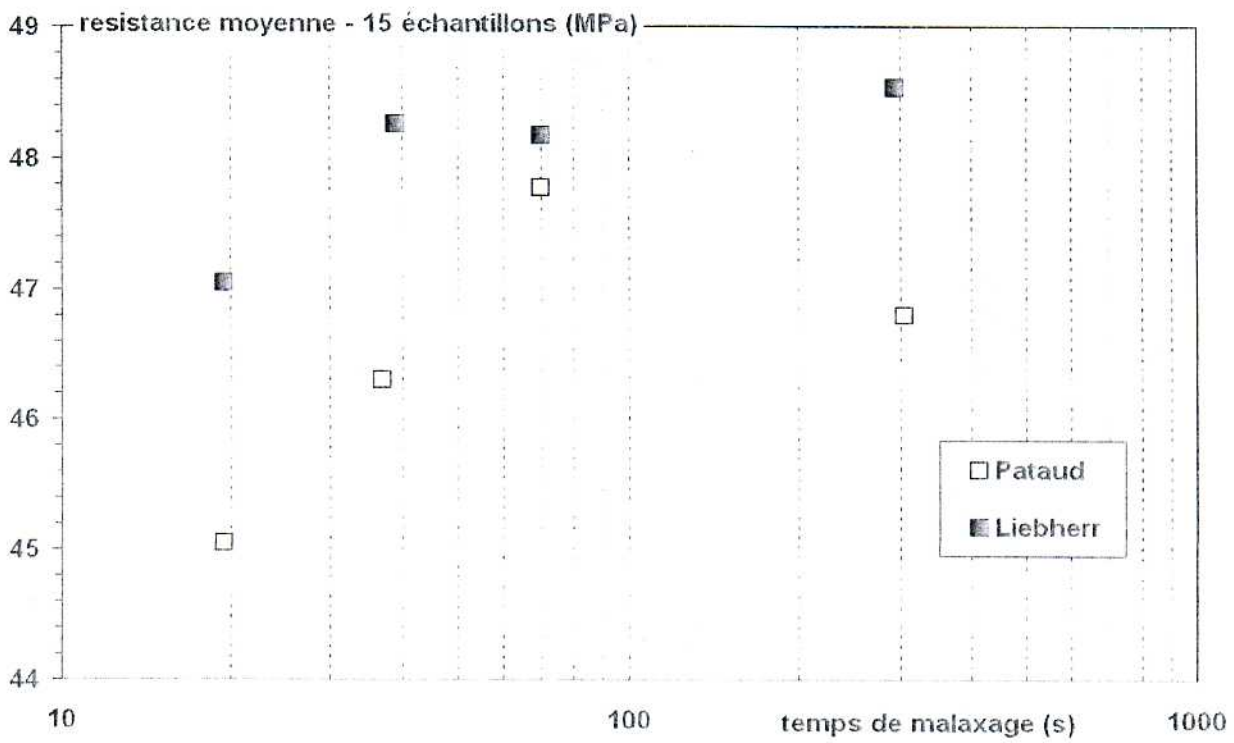


Figure 11. Résistance en compression (moyenne sur 15 échantillons) pour les essais 1L, 2L, 3L, 4L et 1P, 2P, 3P, 4P

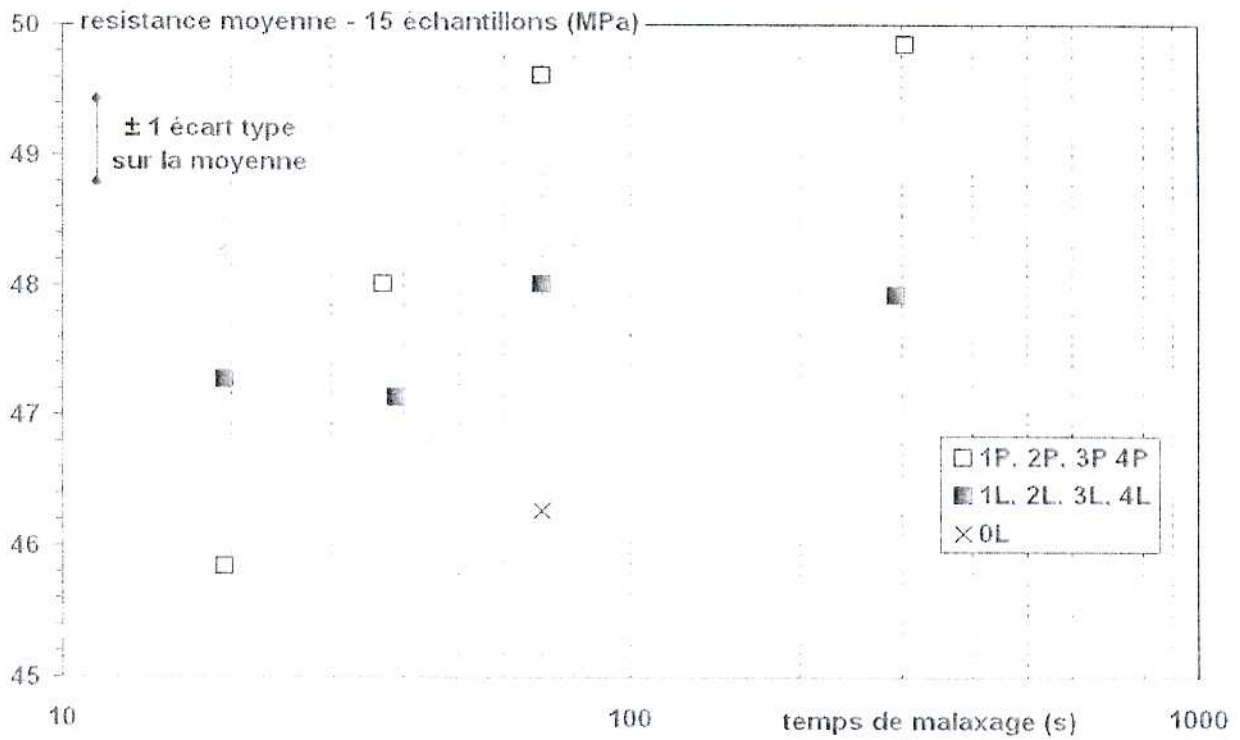


Figure 12. Résistance moyenne corrigée - équivalente pour un béton avec 212 l/m³ d'eau, teneur en air 1,5%

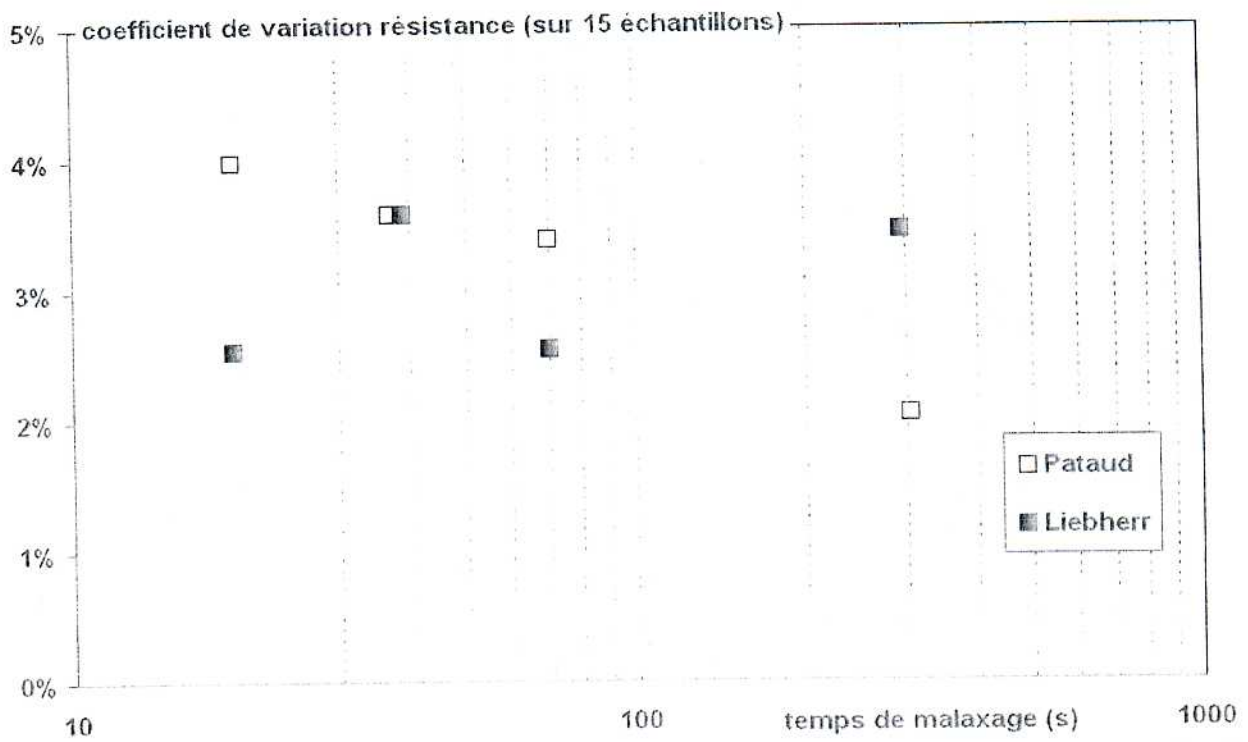


Figure 13. Résistance en compression (coefficient de variation sur 15 échantillons) pour les essais 1L, 2L, 3L, 4L et 1P, 2P, 3P, 4P

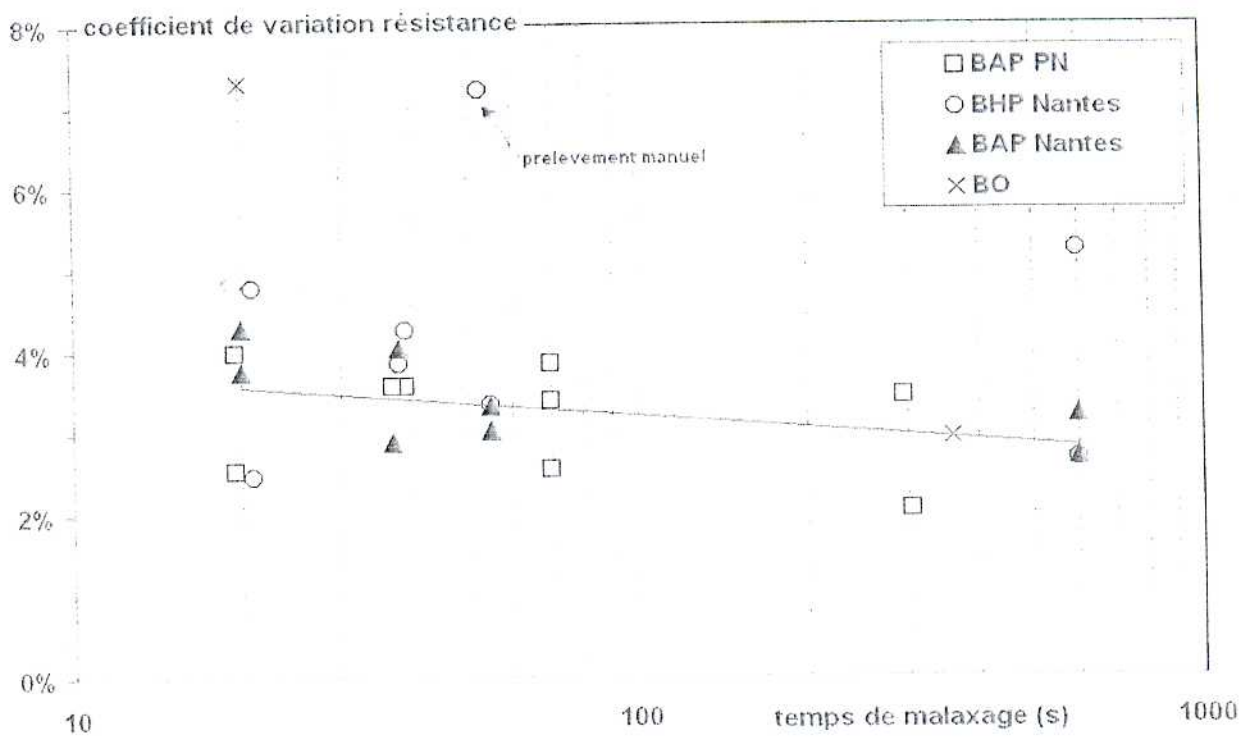


Figure 14. Evolution du coefficient de variation de la résistance avec le temps de malaxage

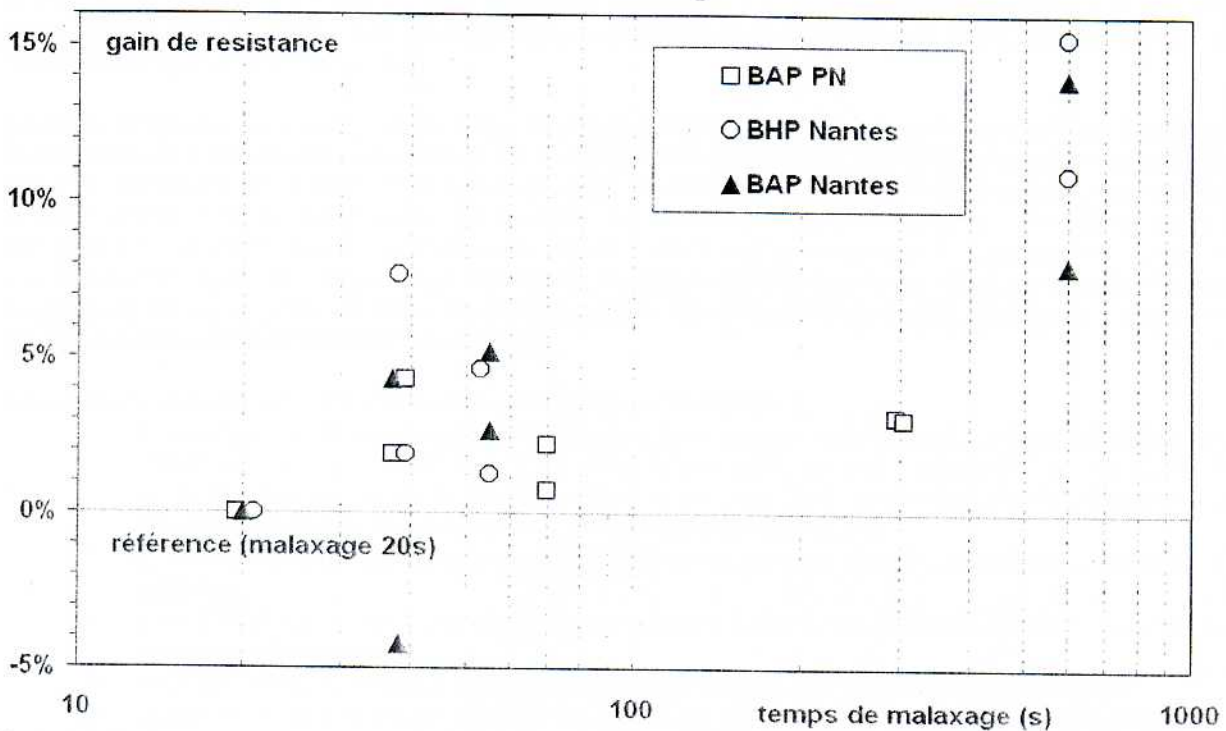


Figure 15. Evolution de la résistance moyenne avec le temps de malaxage

Pour les mêmes essais, nous avons représenté (figure 15) les gains de résistance avec le temps de malaxage par rapport à une référence fixée à 20 secondes de malaxage (après l'introduction de tous les constituants). Pour les fabrications réalisées dans le cadre de la thèse le malaxeur Pataud a été utilisé.

On constate une évolution de la résistance en compression avec le temps de malaxage, mieux analysée dans le cadre de la thèse [3]. La résistance en compression moyenne évolue avec l'inverse du temps de malaxage. Toutefois, la relation proposée dans la thèse, qui inclue une constante « temps de stabilisation », n'a pas pu être confirmée sur les essais réalisés dans cette étude (les temps de stabilisation obtenus ici sont beaucoup plus longs, la courbe du wattmètre décroît même à 300 s).

Conclusion

Les fabrications et les essais réalisés dans le cadre de cette étude nous ont permis de poursuivre dans un premier temps la réflexion (entamée dans le cadre de la thèse de David CHOPIN) sur les outils permettant de voir si les propriétés d'usage du béton sont influencées par le temps et le type de malaxage.

Sur le béton frais, l'essai d'étalement et l'essai de stabilité au tamis semblent être les outils les plus sensibles. Ils permettent de mettre en évidence des évolutions qui ne sont pas visibles lors de l'utilisation du BTRHEOM ou de l'essai à la boîte en L. Ce dernier peut toutefois mettre en évidence des écarts de dosage en eau dans la gâchée. Enfin, nous avons pu montrer que la mesure de la puissance de malaxage est également un bon outil de mesure, qui de plus a l'avantage d'être un moyen d'investigation non-destructif et en continu.

Sur le béton durci, les essais de résistance en compression permettent eux aussi de rendre compte des évolutions dans la structure du matériau. Nous avons jusqu'à présent réalisé un nombre important de ces essais pour chaque gâchée. Nous pouvons à présent affirmer que l'homogénéisation du béton fortement adjuvanté se réalise dans un temps de malaxage court. Des évolutions plus importantes sont remarquées sur la moyenne des résistances (évolution de la microstructure).

Comme nous l'avons déjà fait remarquer dans le paragraphe précédent, une bonne homogénéité du béton est atteinte sans difficulté majeure liée au malaxage (un temps de malaxage court dans un malaxeur de géométrie simple). Les différents processus de malaxage se distinguent davantage par l'évolution des propriétés moyennes

du béton produit. Parmi ces propriétés, des évolutions notables avec le scénario de malaxage sont constatées sur les caractéristiques du béton frais, notamment certaines propriétés d'écoulement (essai d'étalement) et de ségréabilité (essai de stabilité au tamis).

Les effets du système de malaxage et du temps de malaxage sont donc contraires sur les propriétés d'écoulement et sur la résistance mécanique d'une part, et sur la ségréabilité d'autre part. Il semble qu'un choix optimal d'un temps de malaxage pour un système de malaxage et une formule fixés existe (cependant, on peut aussi modifier le béton en amont par la formulation ; par exemple, si on souhaite malaxer longtemps, mais qu'on craint la ségrégation, on peut agir indépendamment sur le paramètre de formulation qui gère la ségrégation de façon à ce que le risque de ségrégation disparaisse). Egalement, le type de malaxeur peut être choisi de manière optimale (du point de vue de la qualité du béton à produire) pour un temps de malaxage donné. Le tableau 3 recense les principales tendances observées lors de cette étude.

Nous pouvons conclure que (pour la formule et les malaxeurs utilisés) :

- si on dispose d'un turbo-malaxeur, le temps de malaxage actuellement pratiqué industriellement semble convenir à la fabrication d'un béton autoplaçant ; on peut malaxer moins long temps en acceptant une perte de performance du béton ou (comme il est montré dans [3]) en choisissant une formule adaptée à un malaxage plus court (généralement plus chère)
- si on dispose d'un malaxeur à double tourbillon on pourrait choisir une réduction du temps de malaxage
- si on doit réduire le temps de malaxage un malaxeur à double tourbillons peut mieux répondre aux contraintes de fabrication.
- si on peut garder le temps de malaxage industriel actuel, on peut utiliser un turbo malaxeur
- dans tous les cas il n'y a pas d'intérêt notable à augmenter le temps de malaxage au delà de 55 s.

	choix du malaxeur et formule imposés				choix du temps de malaxage et formule imposés		
	Pataud		Liebherr		20 s	70 s	5 mn
choix à faire → propriété du béton	malaxer moins	malaxer plus	malaxer moins	malaxer plus	remplacer un turbo malaxeur par un malaxeur à double tourbillons		
Rc moyenne	-	=	-	=	+	+	+
homogénéité Rc	-	+	=	+	+	=	-
étalement moyen	--	+	=	+	++	=	=
homogénéité étalement	--	+	-	+	++	=	=
stabilité tamis	=	--	=	--	-	-	-
boîte en L	=	=	=	=	=	=	=
Décision possible	non	non	oui	non	oui	non	non

Tableau 3. Avantages et inconvénients du choix d'un temps de malaxage ou d'un système de malaxage une fois l'autre option fixée (-- fort inconvénient, - léger inconvénient, = indifférent, + léger avantage, fort avantage)

Remarques importantes :

Lors de cette étude nous avons étudié, en particulier pour les essais sur béton frais un seul béton autoplaçant. Ces conclusions sont valables sans doute pour cette formule, et certaines d'entre elles peuvent être sans doute généralisées. Cependant, compte tenu du nombre important de familles de béton autoplaçant existantes, des études spécifiques seront nécessaires pour des conditions de formulation voire de séquences d'introduction des constituants dans le malaxeur différentes de celles utilisées dans cette étude.

En particulier, il est important de tenir compte de notre système d'introduction des constituants dans le malaxeur. Les temps de malaxage indiqués ici n'incluent pas le malaxage avant le remplissage complet du malaxeur. Or, il est probable que ce malaxage joue un rôle non négligeable dans l'évolution du béton dans le malaxeur. Il serait injustifié de prendre les temps indiqués comme référence absolue et des les appliquer sur des séquences d'introduction des constituants plus rapides.

Enfin, nous n'avons pas pu juger de l'influence des paramètres de malaxage sur la perméabilité du béton durci. Ces essais sont en cours de réalisation à l'IUT de Saint-Nazaire.

Références

- [1] Groupe de rédaction. Bétons Auto-Plaçants – Recommandations Provisoires. Annales du Bâtiment et des Travaux Publics. Juin 2000.
- [2] Norme française XP P 18-305. Béton prêt à l'emploi.
- [3] David CHOPIN. Malaxage des bétons fortement adjuvantés. Thèse LCPC, décembre 2001.
- [4] Eric CHATEAU, Philippe SEMELLE. Essais de sondes de mesure de la teneur en eau. Rapport d'étude SEMR, décembre 2000.
- [5] Eric CHATEAU, Bogdan CAZACLIU. Mesure de la teneur en eau dans un malaxeur. Rapport de recherche SEMR, février 2002.
- [6] Norme française NFP-94 049-1. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux par la méthode de dessiccation en four micro-ondes. février 1996.