

Réduction du temps et de l'énergie de malaxage lors de la fabrication industrielle des bétons autoplaçants

Hai-Thong Ngo¹, Abdelhak Kaci¹, Tien-Tung Ngo¹, El-Hadj Kadri¹

¹Université de Cergy Pontoise, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil

hai-thong.ngo@u-cergy.fr

RÉSUMÉ. La fabrication industrielle des bétons autoplaçants (BAP) est ralentie en raison du temps de malaxage long souvent nécessaire pour ces types de matériaux. L'objectif de ce travail est de proposer une méthode d'optimisation du temps de malaxage en vue de réduire la consommation énergétique et d'augmenter la productivité. Pour cela, une campagne expérimentale menée dans une centrale à béton a été effectuée. La méthode proposée ici consiste à définir le temps nécessaire pour obtenir la stabilisation de la puissance consommée par le malaxeur. Ce temps de stabilisation est ensuite considéré comme le temps de malaxage suffisant pour chaque gâchée de béton. Les résultats expérimentaux obtenus à partir de 23 gâchées de deux formules de BAP fabriquées ont été analysés afin de déterminer la différence de consommation d'énergie entre le processus de malaxage actuel et celui basé sur l'optimisation du temps de malaxage. Les résultats montrent qu'en optimisant le temps de malaxage, la consommation d'énergie est réduite d'environ 13%. En outre, les gains de productivité sont nettement marqués par l'obtention d'une réduction de 16% du temps de malaxage moyen.

ABSTRACT. The industrial production of self-compacting concrete (SCC) is slowed down because of the long mixing time often necessary for these materials. The objective of this study is to propose a method of mixing time optimization in order to reduce mixing energy consumption and improve productivity. For this purpose, an experimental campaign was performed in a full-scale concrete plant. The proposed method consists of defining the time necessary to reach the stabilization of mixer power consumption. This stabilization time is then taken as an adequate mixing time for each concrete batch. Experimental results obtained from 23 batches produced among two SCC mix designs were analyzed to figure out the energy consumption difference between the current mixing process and the one of mixing time optimization. The results show that by optimizing the mixing time, energy consumption is reduced by about 13%. In addition, productivity gains are significantly marked by obtaining a reduction in average mixing time of 16%.

MOTS-CLÉS : béton autoplaçant, temps de malaxage, énergie de malaxage, temps de stabilisation, centrale à béton.

KEY WORDS: self-compacting concrete, mixing time, mixing energy, stabilisation time, concrete plant.

1. Introduction

L'apparition des bétons de nouvelles générations, particulièrement les bétons autoplaçants (BAP) à la fin des années « 80 » au Japon, a marqué un grand progrès technique de l'industrie des bétons prêts à l'emploi et des bétons préfabriqués. Ces bétons sont caractérisés par une grande fluidité permettant de se mettre en place sans vibration et d'être coulés dans des zones très ferraiées. Ils apportent donc sur le chantier un gain de productivité, une réduction importante des nuisances sonores et une amélioration de la qualité esthétique des parements. Cependant, le processus de malaxage de ces bétons présente plus de difficultés par rapport à celui des bétons classiques ce qui réduit la capacité de production de la centrale et augmente significativement les coûts de fabrication [DEL 03]. En effet, ces bétons contiennent une forte proportion des fines avec l'utilisation d'adjuvants divers à très faible dosage tel que les superplastifiants, entraîneurs d'air, agents de viscosité. Cette formulation complexe nécessite un temps de malaxage plus long et une énergie consommée plus élevée pour assurer une bonne dispersion de ses différents constituants dans le mélange [CHO 04]. Il est ainsi important d'optimiser le temps de malaxage et de développer des outils de contrôle plus adaptés à ce type de béton.

Actuellement, au niveau des centrales à bétons, le suivi de l'évolution de la dispersion des constituants qui s'opère au cours du malaxage est effectué par la mesure de la puissance consommée par le malaxeur en fonction du temps (courbe du wattmètre). La stabilisation du signal wattmétrique est traditionnellement utilisée comme indication sur la teneur en eau du béton dans le malaxeur. Son utilisation est indispensable pour assurer le suivi et la correction gâchée par gâchée de la production. D'autre part, le temps nécessaire pour atteindre le palier de stabilisation est considéré par les opérateurs de la centrale comme le temps de fin de malaxage. Cependant, plusieurs secondes sont nécessaires pour remarquer une stabilisation complète de la puissance. Ce temps d'attente supplémentaire dépend de la qualité du signal fourni ainsi que de l'expérience de l'opérateur. Dans le cas des bétons fortement adjuvés (comme les BAP), on a besoin de plus de temps pour constater que le signal n'évolue plus car une large proportion d'adjuvants contenue dans ces bétons, fait constamment évoluer la consistance du mélange, ce qui rend la stabilisation du signal plus difficile à atteindre. Par conséquent, ce procédé de malaxage entraîne une perte de temps de fabrication et donc de productivité associée à des augmentations de la consommation énergétique et un accroissement de l'usure des malaxeurs. Au niveau normatif, le temps de malaxage minimal recommandé pour un béton ordinaire est de 35 secondes et passe jusqu'à 55 secondes pour les bétons autoplaçants [AFNOR 15]. Il est à mentionner également qu'en fonction de la complexité de la formulation, le temps de malaxage peut dépasser deux minutes.

Dans ce contexte, cet article propose une méthode d'optimisation du temps de malaxage en considérant le temps de stabilisation de la courbe de wattmètre comme le temps de malaxage suffisant pour chaque gâchée. Le temps de stabilisation est généralement inférieur au temps de malaxage proposé par l'opérateur. Ainsi, la méthode d'optimisation peut conduire à une augmentation de la productivité. Vu que le malaxage entraîne une consommation d'énergie électrique due à l'action de brassage du système des pales, une réduction de la durée de malaxage permettra de réduire la consommation énergétique. Afin d'évaluer la performance de la méthode dans la réduction du temps et de l'énergie de malaxage, une campagne expérimentale à l'échelle industrielle a été effectuée sur une centrale de béton.

2. Programme expérimental

La campagne expérimentale à l'échelle industrielle est réalisée sur la centrale de béton prêt à l'emploi de Cemex France à Sains-en-Gohelle (62). Les constituants du béton sont pesés et malaxés dans un malaxeur à cuve annulaire de volume nominal 2 m^3 . Le malaxeur est équipé d'un wattmètre mesurant en continu la puissance consommée par le malaxeur lors de la fabrication. Le wattmètre effectue une mesure par demi-seconde à partir du début de l'introduction des constituants jusqu'à la fin de la vidange du malaxeur. La procédure de l'introduction des matériaux est imposée par l'opérateur de la centrale selon un cycle industriel comme suivant :

- Les gravillons et sables sont d'abord introduits dans le malaxeur.
- L'introduction du ciment et de l'adjuvant est poursuivie après 10 secondes.
- Après 20 secondes du malaxage à sec, l'eau et l'adjuvant sont introduits. Ces composants liquides sont pulvérisés sur la partie supérieure du mélange durant environ de 9 à 11 secondes en fonction de leur quantité.

La Figure 1 présente un exemple de l'évolution de la puissance consommée en fonction du temps d'une gâchée de béton en centrale. La séquence de fabrication et le temps de malaxage sont également indiqués sur la même figure. Le signal du wattmètre dont la valeur est mesurée en pourcentage de la puissance nominale du moteur du malaxeur (75 kW), évolue tout le long du malaxage. Le temps de malaxage ici est compté à partir de

la fin de l'introduction de tous les constituants jusqu'à la vidange du béton. Pour chaque gâchée fabriquée, ce temps est choisi de manière à pouvoir obtenir une stabilisation complète de la puissance afin d'éviter le malaxage incomplet. Après la fin de malaxage, le béton frais est vidangé dans le camion toupie qui part ensuite livrer le chantier.

Le programme expérimental est constitué de 23 gâchées de 2 m³ fabriquées à partir de deux formules de béton à caractère autoplaçant. Les compositions des bétons étudiés sont présentées dans la partie suivante.

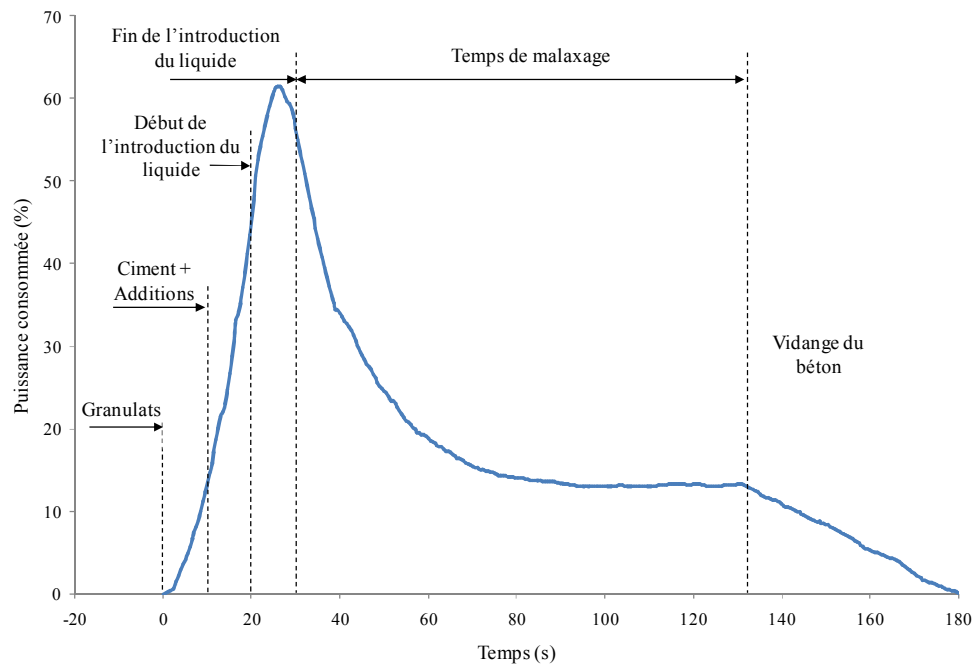


Figure 1. Courbe de wattmètre d'une gâchée de béton indiquant la séquence de fabrication

2.1 Matériaux et composition des BAP

Le Tableau 1 donne les compositions des deux formulations de bétons autoplaçants, BAP1 et BAP2 utilisées dans le cadre de cette étude. Deux types de sables (siliceux et calcaires) de même classe granulaire (0/4) mais avec une distribution granulaire différente permettant d'optimiser la compacité du mélange sont utilisés. Les bétons sont formulés à partir de gravillons calcaires concassés avec un diamètre des grains entre 4 et 20 mm. La matrice cimentaire est composée de ciment Portland CEM I 52,2 N et de filler calcaire. Afin de réduire la quantité d'eau de gâchage par rapport à un béton non adjuvanté tout en conservant la même ouvrabilité, un superplastifiant à base de polycarboxylate est utilisé pour toutes les formulations de BAP. Un deuxième adjuvant, l'agent de viscosité, est également introduit dans le but d'éviter la ségrégation et d'assurer de la stabilité du mélange.

Tableau 1. Compositions des deux formulations de BAP étudiées

Composition (kg/m ³)	BAP1	BAP2
Ciment	290	300
Filler calcaire	90	120
Sable 1 (0/4)	298	364
Sable 2 (0/4)	602	496
Gravillon 2 (4/20)	900	862
Superplastifiant	5,7	6,64
Agent de viscosité	0,51	1
Eau efficace	180	180
Nombre de gâchées	12	11

Pour chaque formule, seul le paramètre de l'eau totale varie d'une gâchée à l'autre. Cette quantité d'eau est constituée par le cumul de l'humidité des granulats, de l'eau d'ajout et de l'eau contenue dans les adjuvants. L'humidité des sables est mesurée par l'intermédiaire des sondes d'humidité de type micro-ondes. L'humidité des graviers ne varie pas significativement pendant toute la journée de production. Il convient de noter que l'ouvrabilité du béton dépend essentiellement de l'eau efficace qui correspond à la différence entre l'eau totale et l'eau absorbée par les granulats. La quantité de l'eau absorbée par les granulats est égale à 9 L/m³ pour le BAP1 et 8,6 L/m³ pour le BAP2.

2.2 Essai d'étalement

Pour chaque gâchée fabriquée, l'ouvrabilité du béton frais est évaluée par l'essai d'étalement au cône d'Abrams d'après la norme ASTM C1611 [ASTM 14]. Pour des raisons pratiques, dans cette centrale, l'essai d'étalement est effectué avec le cône à l'envers afin de le rendre plus facile à remplir. Les valeurs d'étalement de toutes les gâchées varient entre 62 cm et 76 cm. En outre, un autre indice dénommé VSI¹ (Visual Stability Index) est aussi utilisé pour identifier visuellement le niveau de ségrégation de béton. Les indices sont égaux à 0 ou 1, ce qui montre que les bétons sont stables et présentent aucun risque de ségrégation.

3. Définition du temps de stabilisation

Dans la production industrielle du béton, la courbe de wattmètre est souvent enregistrée pour déterminer le moment de la vidange du béton. En règle générale, le béton est déchargé lorsque le temps nécessaire pour atteindre le palier de stabilisation, appelé "temps de stabilisation" est atteint [CHO 03].

Des études précédentes ont démontré que l'évolution des propriétés du béton frais devient négligeable dès que la puissance consommée diminue au-dessous d'une valeur seuil définie [MAZ 08, SCH 07]. Cela permet de calculer le temps de stabilisation (T_s) et par conséquent déterminer le temps de malaxage le plus court possible. Concrètement, la détermination du T_s est réalisée à l'aide de certains modèles de lissage des courbes de wattmètre proposés dans la littérature. Plusieurs auteurs se sont mis d'accord pour utiliser des modèles exponentiels dans le lissage de la partie décroissante de ces courbes [CHO 04, MAZ 10]. Ces expressions mathématiques sont notamment adaptées aux bétons ordinaires et certaines formules de BAP ayant une faible viscosité caractérisée par un rapport eau/liant (E/L) élevé. Dans ces mélanges, l'évolution de la puissance en fonction du temps montre d'abord qu'une augmentation de la puissance lors du chargement des constituants, puis une diminution de cette dernière au cours du malaxage jusqu'à l'obtention d'une stabilisation du signal (voir Figure 1). Cependant, les courbes des BAP de grande viscosité caractérisée par un faible E/L et/ou grand dosage en adjuvants (super plastifiant, agent de viscosité...) ne peuvent pas être traitées de la même manière. En effet, lors de l'observation de l'allure de ces courbes, l'apparition d'un deuxième pic de la puissance, après la phase de l'introduction de l'eau, rend ces modèles inappropriés (voir Figure 2). La particularité de ce deuxième pic marquant l'augmentation de la cohésion du matériau lors du malaxage, a été mentionnée dans de nombreux travaux de recherches [BRU 07, CAZ 13, CAZ 09].

Pour cette raison, une méthode alternative consiste à utiliser la fluctuation de la puissance consommée, associée à la puissance de malaxage en fonction du temps dans le but de déterminer le moment auquel la puissance devient stable (Figure 2). Cette fluctuation est évaluée en calculant l'écart type de 20 mesures consécutives de la puissance de malaxage (10 secondes après un temps donné). Le temps de stabilisation sera pris dès que l'écart-type de puissance est égal à une valeur seuil ε à déterminer. En observant et analysant toutes les courbes de wattmètres expérimentales, lorsque l'écart type de puissance diminue en dessous de ε fixée à 0,15% en valeur absolu, il n'y a plus de grande fluctuation du signal wattmétrique et le temps de stabilisation est donc atteint. Le point trouvé à la fin du temps de stabilisation est appelé "point de stabilisation". Après ce point, l'ouvrabilité du béton frais est considérée comme optimale. Pour une grande majorité des courbes, le fait de fixer ε à 0,15% assure que toutes les valeurs qui suivent, restent toujours inférieurs à la valeur seuil. De plus, le choix de cette dernière permet également d'obtenir des temps de stabilisation de l'ordre de ceux définis par le référentiel de la marque NF [AFNOR 15], soit environ 55 secondes pour les formules de BAP les plus rapidement stabilisés.

Il faut également noter que le choix de ε n'est significatif que pour un malaxeur donné. Lors des essais effectués sur des malaxeurs différents, une nouvelle valeur seuil doit être adoptée en analysant de différentes courbes de wattmètre obtenues par le malaxeur correspondant.

¹ Visual Stability Index Values : 0 = Highly Stable; 1 = Stable; 2 = Unstable; 3 = Highly Unstable

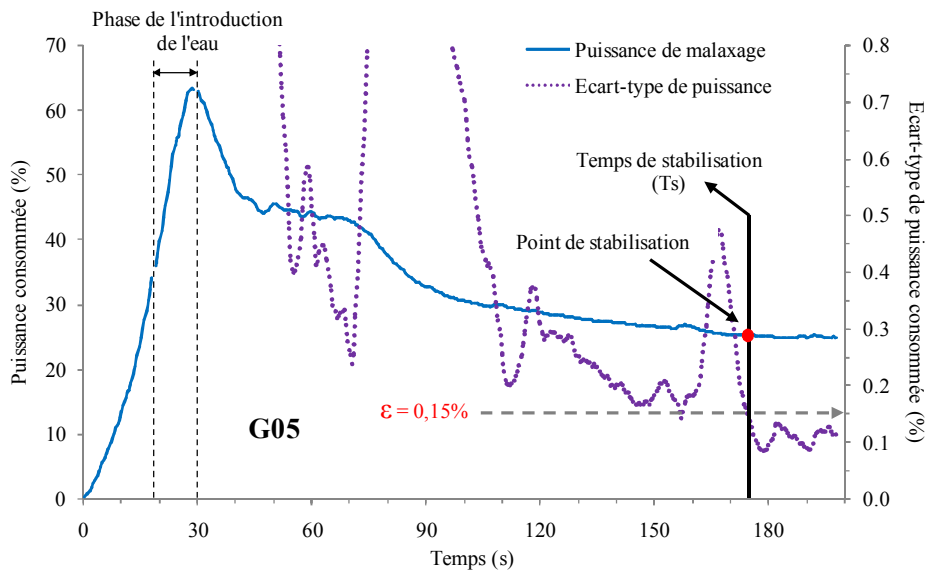


Figure 2. L'évolution de la puissance de malaxage et son écart-type en fonction du temps de la gâchée G05 sont utilisés pour déterminer le temps de stabilisation

4. Résultats et discussions

4.1 Evaluation de la méthode d'optimisation du temps de malaxage

En utilisant T_s comme le temps de malaxage suffisant pour chaque fabrication, l'écart du temps de malaxage dénommé ΔT , peut être évaluée et quantifiée à l'aide de la différence entre le temps de malaxage total (T_m) et T_s . L'écart de la consommation d'énergie dénommée ΔE est ensuite déterminé en multipliant ΔT par la valeur moyenne de la puissance consommée après stabilisation du wattmètre. Autrement dit, ΔE est égal à l'aire sous la courbe de la puissance de malaxage sur l'intervalle (T_s , T_m). Un exemple de calcul du ΔE de la gâchée G07 (l'aire hachurée ci-contre) est présenté dans la Figure 3.

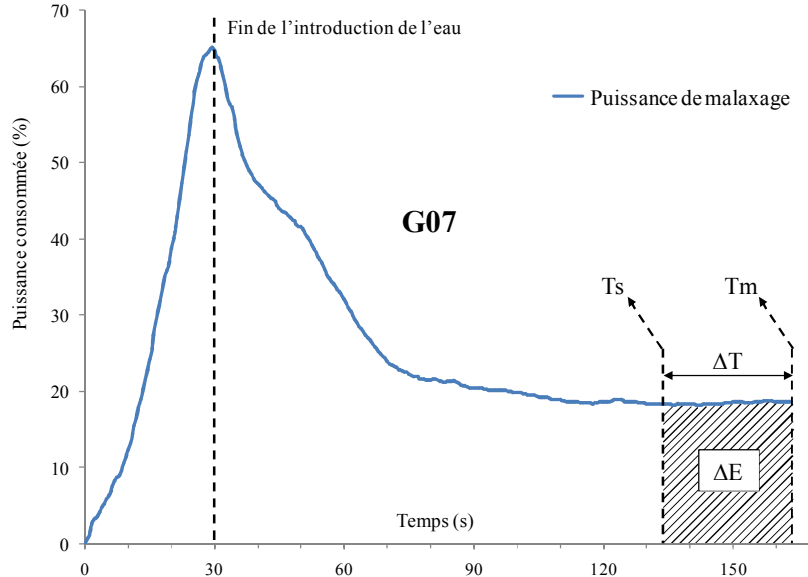


Figure 3. Détermination de l'écart de la consommation énergétique (ΔE) de la gâchée G07

Le Tableau 2 donne les résultats des calculs du temps de stabilisation, de l'écart du temps de malaxage et celui de la consommation énergétique pour toutes les gâchées fabriquées. Les résultats montrent d'abord un effet remarquable de la quantité d'eau totale sur le temps de stabilisation de la courbe de wattmètre : plus le béton est riche en eau, plus T_s est faible. En effet, l'augmentation de la teneur en eau conduit à une réduction de la friction entre les particules ce qui permet une meilleure lubrification. Cela signifie que moins d'énergie et de temps de

malaxage sont demandés pour homogénéiser le mélange. Toutefois, il n'y a pas d'effet significatif du dosage en eau sur l'écart du temps et de l'énergie de malaxage. Ces derniers dépendent essentiellement de l'expérience de l'opérateur de la centrale ainsi que de la qualité du signal wattmétrique.

Tableau 2. Descriptions des gâchées réalisées et résultats des calculs de temps et d'énergie de malaxage

Formules	N° Gâchée	Eau totale (L/m ³)	Ts (s)	ΔT (s)	ΔE (Wh)
BAP1	G01	193	99,5	23,5	91,6
	G02	183	119,0	15,0	61,3
	G03	179	107,0	39,0	175,5
	G04	175	128,0	24,0	115,0
	G05	171	145,0	22,0	113,2
	G06	192	91,0	23,0	80,0
	G07	189	104,5	29,5	111,9
	G08	187	106,0	12,0	45,0
	G09	186	114,0	23,0	98,7
	G10	177	125,0	27,0	128,3
	G11	200	81,5	30,5	94,0
	G12	185	111,0	30,0	133,1
BAP2	G13	196	80,0	11,0	36,9
	G14	183	115,5	11,5	46,7
	G15	192	89,5	19,5	67,8
	G16	188	101,0	32,0	121,3
	G17	179	128,0	26,0	123,5
	G18	187	106,0	10,0	40,6
	G19	191	101,5	18,5	70,5
	G20	176	145,0	11,0	52,7
	G21	189	94,5	11,5	41,4
	G22	195	90,0	23,0	84,3
	G23	181	137,5	13,5	63,0

Les résultats des mesures de la consommation énergétique totale et du temps de malaxage total pour chaque BAP étudié dans le processus actuel de malaxage sont indiqués dans le Tableau 3. La fabrication de 12 gâchées de BAP1 consomme 7566 Wh de l'énergie de malaxage. Dans le cas de BAP2, 6946 Wh est nécessaire pour fabriquer 11 gâchées. Le temps de malaxage total des BAP1 est de 1630 secondes et celui des BAP2 est de 1370 secondes. Il est important de noter que le calcul de l'énergie de malaxage est effectué en basant sur l'évolution de la puissance de malaxage à partir de la fin de l'introduction de l'eau indiquant le début du temps de malaxage.

Tableau 3. Résultats des mesures de la consommation totale d'énergie et du temps de malaxage total pour les deux BAP étudiés dans le processus actuel de malaxage.

Formules	Nombre de gâchée	Consommation totale d'énergie pour le malaxage (Wh)	Temps de malaxage total (s)
BAP1	12	7566	1630
BAP2	11	6946	1370

Le Tableau 4 présente la réduction du temps de malaxage et celle de la consommation énergétique par rapport au processus actuel de malaxage à l'aide de la méthode d'optimisation. Comme indiqué dans ce tableau, les temps de malaxage des formules de BAP1 et BAP2 sont respectivement réduits de 18% et 14%. De plus, cette réduction du temps de malaxage permet d'économiser respectivement jusqu'à 16% et 10% de la consommation énergétique pour les BAP1 et BAP2. Ces résultats conduisent à une réduction totale de 16% du temps de malaxage et 13% de l'énergie de malaxage ce qui est l'objectif de cet article. Enfin, il est également

remarqué que le taux de réduction de la consommation énergétique est inférieur à celui du temps de malaxage. Cela est dû à la valeur de la puissance consommée pendant le temps de malaxage étant toujours supérieure à celle après la stabilisation du wattmètre.

Tableau 4. Réductions de la consommation d'énergie et du temps de malaxage par rapport au processus actuel de malaxage

Formules	Nombre de gâchée	Réduction de la consommation d'énergie de malaxage (%)	Réduction du temps de malaxage (%)
BAP1	12	16	18
BAP2	11	10	14
Totale	23	13	16

4.2 Ligne de stabilisation

La Figure 4 montre l'évolution de la puissance en fonction du temps de cinq gâchées de béton ainsi que les points de stabilisation de 23 gâchées fabriquées. En observant cette figure, nous constatons que les points de stabilisation sont positionnés sur une ligne de tendance, appelée "ligne de stabilisation" qui est principalement linéaire. Après l'intersection entre la courbe de puissance et cette ligne, la variation de la puissance consommée devient négligeable (i.e. l'écart type de la puissance inférieur à 0,15%). Par conséquent, le malaxage prolongé n'est pas nécessaire lorsque la puissance de malaxage atteint la ligne de stabilisation.

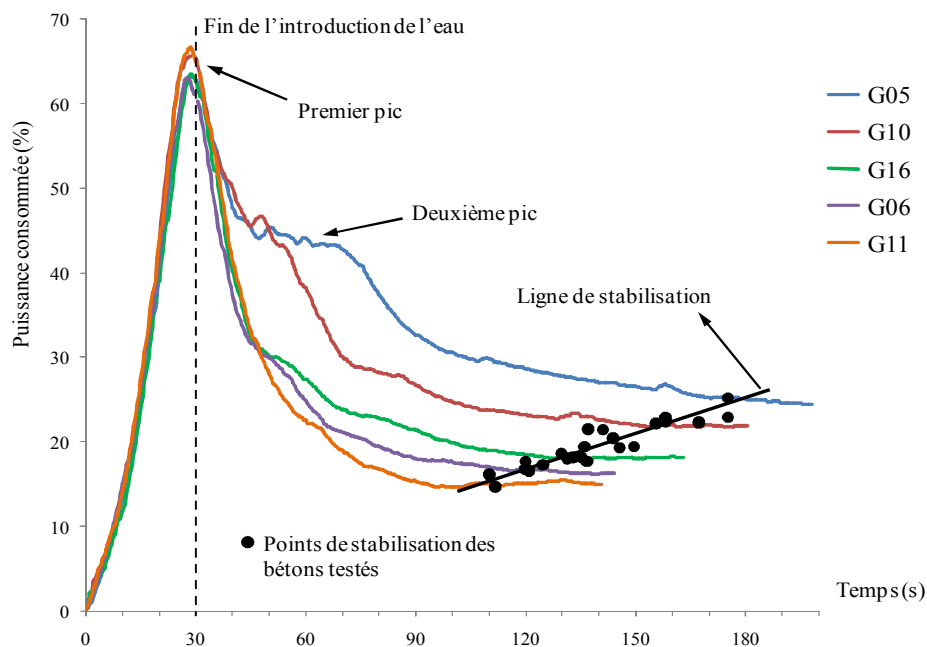


Figure 4. Cinq courbes de wattmètre et points de stabilisation des gâchées fabriquées

En outre, il est également remarqué que certaines courbes des bétons de faible dosage en eau présentent un deuxième pic de la puissance de malaxage après la première croissante dû au remplissage des constituants. L'apparition de ce pic semble liée à l'utilisation de l'agent de viscosité dans le mélange, ce qui augmente la viscosité et la cohésion de la pâte de ciment au cours du malaxage. La relation entre ce type d'adjuvant et le deuxième pic a été analysée dans une autre campagne expérimentale [NGO 16].

5. Conclusion

Dans cette étude, le temps de fabrication et la consommation énergétique durant le processus de malaxage en centrale à béton sont réduits grâce à l'optimisation du temps de malaxage. La méthode d'optimisation proposée

ici consiste à définir un temps de stabilisation de la courbe de wattmètre enregistrée au cours du malaxage. Les résultats obtenus travers d'une campagne expérimentale à échelle industrielle montrent que lorsque le temps de stabilisation est considéré comme le temps de malaxage suffisant pour chaque béton fabriqué, une réduction du temps de malaxage (jusqu'à 16%) et de l'énergie de malaxage (jusqu'à 13%) peuvent être envisagées.

Pour une configuration industrielle donnée (malaxeur et séquence de fabrication donnée), les points de stabilisation indiquant les points finaux potentiels de production, sont localisés sur une ligne de tendance (ligne de stabilisation) présentée dans un diagramme puissance-temps. Le calibrage de cette ligne est essentiellement perturbé par le type de malaxeur (changement de puissance de malaxage). Des recherches complémentaires auront pour objectif de mettre en œuvre une procédure de contrôle en ligne en utilisant la ligne de stabilisation en vue d'améliorer la productivité et la régularité du BAP en production.

Remerciement

Les auteurs remercient Alain Trudel, Sylvie Lecrux et l'ensemble du personnel de l'entreprise CEMEX pour leur aide technique et du support financier de cette étude.

6. Bibliographie

[AFNOR 15] AFNOR, Référentiel de certification : Béton prêt à l'emploi, Janvier 2015.

[ASTM 14] ASTM C1611 / C1611M - 14, Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, 2014.

[BRU 07] BRUNQUET E., CAZACLIU B., « In-situ on-line control of SCC production regularity », *Proceedings of 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC 2007)*, Ghent, Belgium, 3-5 September 2007, p. 251-257.

[CAZ 13] CAZACLIU B., « Mixing self compacting concrete: mixers, mixing methods, mixing time », *7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*, Paris, France 2013, p. 57-64.

[CAZ 09] CAZACLIU B., ROQUET N., « Concrete mixing kinetics by means of power measurement », *Cement and Concrete Research*, vol. 39, n° 3, 2009, p. 182-194.

[CHO 03] CHOPIN D., Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants: Optimisation du temps de fabrication. Doctoral Thesis of Ecole Centrale de Nantes, 2003.

[CHO 04] CHOPIN D., DE LARRARD F., CAZACLIU B., « Why do HPC and SCC require a longer mixing time? », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 12, 2004, p. 2237-2243.

[DEL 03] DE LARRARD F., CAZACLIU B., CHOPIN D., CHATEAU E., WALLEVIK O., NIELSSON I., « Production of SCC », *Proceeding of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003, p. 481-494.

[MAZ 10] MAZANEC O., LOWKE D., SCHIEBL P., « Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time », *Materials and Structures*, vol. 43, n° 3, 2010, p. 357-365.

[MAZ 08] MAZANEC O., SCHIEBL P., « Mixing time optimisation for UHPC », *Proceedings of the second international symposium on ultra high performance concrete*, Kassel, 2008, p. 401-408.

[NGO 16] NGO H.-T., KADRI E.-H., KACI A., NGO T.-T., TRUDEL A., LECRUX S., « Advanced online water content measurement for self-compacting concrete production in ready-mixed concrete plants », *Construction and Building Materials*, vol. 112, n°, 2016, p. 570-580.

[SCH 07] SCHIEBL P., MAZANEC O., LOWKE D., « SCC and UHPC—effect of mixing technology on fresh concrete properties », *Advances in Construction Materials 2007*, Springer Berlin Heidelberg, vol., 2007, p. 513-522.