

Impact de la formulation du béton sur les propriétés thermiques et mécaniques

Agathe Bourchy¹, Laury Barnes Davin², Laetitia Bessette², Florian Chalencon³, Aurélien Joron³, Jean Michel Torrenti¹

¹Université Paris Est, IFSTTAR, 14-20 boulevard Newton, 77420 Champ-sur-marne; email: agathe.bourchy@ifsttar.fr; jean-michel.torrenti@ifsttar.fr

²Vicat, 4 rue Aristide Bergès, 38081 L'Isle d'Abeau Cedex; email: laury.barnes@vicat.fr; laetitia.bessette@vicat.fr

³Sigma Béton, 4 rue Aristide Bergès, 38081 L'Isle d'Abeau Cedex, email: florian.chalencon@vicat.fr; aurelien.joron@vicat.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Cette étude a pour but, à l'aide de plans d'expériences, de mieux comprendre comment la formulation et la présence d'additions influe sur les caractéristiques du béton telles que chaleur d'hydratation du béton et l'évolution des résistances mécaniques en compression. Par ailleurs, de par la quantité de données acquises, un outil est créé afin d'optimiser la formulation du béton par rapport à la température adiabatique maximale atteinte lors de l'hydratation et pour des résistances mécaniques visées.

ABSTRACT. In this study, using experimental design principles, the hydration heat by QAB and the evolution of compressive strengths are measured in order to determine how the composition of concrete and the presence of SCM influence concrete characteristics and to create a formulation protocol. This protocol can help to determine which mix-design minimizes the hydration temperature for a given compressive strength.

MOTS-CLÉS : béton, formulation, additions minérales, chaleur d'hydratation, résistances en compression.

KEY WORDS: concrete, formulation, supplementary cementitious materials, hydration heat, compressive strengths.

1. Introduction

L'exothermie des réactions d'hydratation ainsi que l'interaction entre le comportement thermique, hydrique et mécanique du ciment au jeune âge peut entraîner, si les déformations sont gênées, l'apparition de contraintes de compression puis de traction dans le béton et potentiellement un risque de fissuration si les contraintes deviennent trop importantes, mettant ainsi en danger la durabilité du béton. Afin de prévenir le risque de fissuration et de réaction sulfatique interne (RSI), l'utilisation de ciment résistant aux sulfates comptant ou non des additions est préconisée. L'ajout d'additions minérales dans le béton telles que le filler calcaire, le laitier de haut fourneau ou la cendre volante peut également être une option envisagée pour limiter l'exothermie des réactions cimentaires et protéger contre la RSI.

L'objectif de cette recherche est de présenter un plan d'expériences permettant de mettre en évidence l'influence des différents paramètres des ciments (composition, finesse) et des bétons (type et quantité d'addition, E/L, adjuvantation) sur la rhéologie, la chaleur d'hydratation et la résistance des bétons. A partir de ce plan d'expériences un modèle de formulation est établi qui permet d'optimiser les formules de bétons selon des critères comme la température maximale atteinte dans un essai quasi adiabatique ou la résistance à 28 jours.

2. Etat de l'art

Le ciment, matériau hydraulique, acquiert une résistance mécanique après réaction. Cependant, la réaction d'hydratation est exothermique, et produit de la chaleur au cours du temps, ce qui, dans certaines conditions peut

entraîner des risques de RSI (Réaction Sulfatique Induite) ou de fissuration. P4,30 (15 min) actuellement courant et prévu par les normes d'utiliser d'autres matériaux – réactifs ou non – à la fois dans le ciment mais également dans le béton [AFN 14]. En effet, la présence d'additions dans les matériaux cimentaires modifient leurs propriétés au cours du temps [BES 04]. A l'état frais, le squelette granulaire et les contacts entre les particules sont modifiés par la présence d'additions. Au cours de l'hydratation, les additions interagissent avec les hydrates formés, créant parfois de nouveaux hydrates et modifiant ainsi les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux obtenus. Plusieurs phénomènes peuvent expliquer ces changements : un effet granulaire qui agit sur l'état frais et la rhéologie du matériau et un effet physicochimique qui agit sur l'hydratation et la prise du matériau jusqu'à son durcissement. L'effet granulaire ou filler est principalement dû aux additions fines ou ultrafines de type filler calcaire et fumée de silice qui s'intercalent dans le squelette granulaire du matériau cimentaire [CYR 06]. Cet effet peut être bénéfique ou néfaste sur les propriétés du matériau à l'état frais telles que l'affaissement et la rhéologie selon le squelette granulaire obtenu. Ainsi, d'après Ramachandran et al., la présence de cendre volante augmente la fluidité du béton de par sa forme sphérique [RAM 95] alors que le laitier de par sa surface irrégulière influe défavorablement sur l'empilement granulaire ce qui a pour effet d'augmenter la viscosité des bétons au laitier [BOU 07]. L'effet physicochimique quant à lui s'explique par les interactions entre les additions, les anhydres et les hydrates formés, ce qui modifie le processus d'hydratation [BES 04] [BER 15]. De manière générale, la présence d'additions minérales dans le ciment diminue la chaleur d'hydratation émise au jeune âge [LOT 11]. Lawrence et al. affirment que la présence de filler calcaire améliore les résistances mécaniques au jeune âge de par ses réactions avec le C3A et C4AF du clinker conduisant à la formation d'aluminates et de carboaluminates mais devient négligeable à long terme [LAW 05].

Les variations de besoin en eau et de fluidité dues à la présence d'additions minérales dans le béton peuvent être régulées par l'utilisation d'adjuvants permettant une défloculation du béton à l'état frais libérant ainsi l'eau piégée entre les grains solides [KAD 98]. La présence de ces adjuvants peut permettre la diminution du rapport eau sur liant et ainsi augmenter les résistances mécaniques du béton fabriqué.

La prise en compte des additions minérales dans le béton se fait au travers de la notion de liant équivalent correspondant à la somme du ciment et de l'addition minérale avec un coefficient d'activité multiplicateur de la quantité d'addition. Il est possible d'estimer les résistances mécaniques obtenues avec ces additions minérales à partir de la formule de Bolomey. A noter cependant que ce coefficient d'activité entrant dans la formule de Bolomey par le calcul de liant équivalent dépend du type et de la quantité d'addition, du type de ciment utilisé dans le béton et de l'âge [CYR 00].

Cette courte revue bibliographique montre que plusieurs paramètres de formulation influent sur les propriétés des bétons. Cette étude a donc pour but de mieux comprendre les effets et interactions entre tous ces paramètres à l'aide d'un plan d'expériences, afin d'en tirer un modèle de formulation correspondant à un cahier des charges préalablement défini.

3. Matériels et méthodes

Suite aux paramètres mis en évidence dans le paragraphe précédent, il est décidé d'orienter cette étude vers l'influence du type et de la quantité de ciment, du type et de la quantité d'additions, du rapport eau sur liant et du pourcentage d'adjuvant fluidifiant utilisé sur la thermomécanique du béton au jeune âge. Pour cela, trois ciments et additions sont sélectionnés afin de comparer leurs effets sur la chaleur dégagée ainsi que les propriétés mécaniques obtenues.

1.1. Matières premières

Les ciments ont été sélectionnés selon leur chaleur d'hydratation et leurs résistances mécaniques en compression. Il s'agit de ciments fabriqués sur un broyeur pilote. Ces trois ciments ont une composition allant du CEM I au CEM II/B-LL.

Le premier ciment sélectionné, équivalent à un CEM II/B-LL, contient 35 % de filler calcaire, 5,85 % d'anhydrite et a un diamètre médian de 12 μm . Il est noté C1. Le deuxième ciment, équivalent à un CEM II/A-LL, contient 20 % de filler calcaire, 5,85 % d'anhydrite et a un diamètre médian de 12 μm . Il est noté C2. Enfin, le troisième ciment, équivalent à un CEM I, contient 5 % de filler calcaire et 7,85 % d'anhydrite et a un diamètre médian de 9 μm . Il est noté C3. Les ciments C1 et C2 ont une chaleur d'hydratation équivalente à 7 jours de l'ordre de 300 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ alors que la chaleur d'hydratation du C3 est de l'ordre de 400 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$.

L'influence de trois additions différentes dans le béton est étudiée : un laitier granulé de haut fourneau broyé à un Blaine à 4230 $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ produit par la société Ecocem, une cendre volante provenant de Carling avec un

Blaine de 3360 cm².g⁻¹ et une teneur en fumée de silice de 5,15% (14,80% (15 jours) société Condensil. La présence d'additions dans le béton doit permettre de réduire la quantité de chaleur dégagée au jeune âge du ciment par effet de dilution. Les bornes de travail des additions ont été sélectionnées par rapport aux pourcentages moyens d'additions habituellement utilisés dans les bétons avec une variation de plus ou moins 50 % autour de cette valeur. Ainsi, les quantités de laitier sont centrées sur 50%, celles de cendre volante sur 25 % et celles de fumée de silice sur 8 %.

Dans le Tableau 1 sont détaillées et les caractéristiques physiques des ciments sélectionnés. A noter que les résultats granulométriques obtenus pour la fumée de silice sont élevés. Ceci s'explique par la méthode en voie humide utilisée qui n'est pas assez puissante pour briser les agglomérats densifiés. De plus, les indices d'activités ne sont pas mesurés avec les ciments du plan d'expériences mais avec les ciments de référence demandés dans la norme NF 197-1, ce qui peut expliquer les différences de valeurs obtenues par rapport aux résultats détaillés plus loin.

	C1	C2	C3	Laitier	Cendre volante	Fumée de silice
D50 (µm)	11,2	11,4	12,0	10,8	17,2	58,2
Blaine (cm ² .g ⁻¹)	5300	4450	4270	4230	3360	NC
Masse volumique (g.cm ⁻³)	3,00	3,06	3,13	2,96	2,31	2,27
Demande en eau (%)	32,0	34,0	37,0	-	-	-
Début de prise (min)	185	170	240	-	-	-
Fin de prise (min)	260	225	310	-	-	-
Indice d'activité à 28 jours	-	-	-	0,9	0,8	1,2

Tableau 1. Caractéristiques physiques des trois ciments et additions sélectionnés pour les essais béton [AFN 12].

A noter que la demande en eau des ciments est supérieure à celle habituellement obtenue pour les ciments commerciaux du fait de leur broyage sur une installation pilote, ce qui peut avoir un impact sur la rhéologie du béton. Dans le Tableau 2 sont ensuite répertoriées les caractéristiques thermiques et mécaniques des ciments sélectionnés, avec des résistances mécaniques à 28 jours allant de 40 à 60 MPa. Enfin, l'adjuvant utilisé lors de cette étude est le MasterPolyheed 650 de BASF.

	C1	C2	C3
Q41 (J.g ⁻¹)	255	296	364
Q120 (J.g ⁻¹)	274	302	392
Q168 (J.g ⁻¹)	294	303	406
Echauffement maximum (°C)	25,6	29,3	36,3
Rc 1 jour (MPa)	8,2	13,3	15,4
Rc 2 jours (MPa)	20,4	24,7	27,5
Rc 28 jours (MPa)	39,4	49,0	60,2

Tableau 2. Caractéristiques thermiques (essais Langavant) et mécaniques obtenus sur mortier normalisé des trois ciments sélectionnés pour les essais béton.

1.2. Nomenclature

Afin de faciliter la lecture, une nomenclature est adoptée. Elle reprend les cinq paramètres sélectionnés dans les plans d'expérience. Chaque échantillon portera un nom comme suit :

$$C_x_ \% \text{Addition_} E/L_ \% \text{Adjuvant}$$

Cette nomenclature se divise comme suit :

- C_x correspond au type de ciment utilisé et sera donc remplacé par C1, C2 ou C3,
- %Addition correspond au pourcentage de l'addition et sera donc remplacé par le pourcentage ajouté suivi de la lettre S pour laitier, FA pour les cendres volantes et SF pour la fumée de silice,
- E/L correspond au rapport eau sur liant et sera donc remplacé par le pourcentage correspondant selon chaque béton,
- %Adjuvant correspond au pourcentage d'adjuvant utilisé.

Afin de mieux comprendre l'influence de certains paramètres sur les dégagements de chaleurs et les montées en résistance mécanique, un plan d'expériences de type criblage est réalisé. Pour cela, le type de ciment, le type et de la quantité d'addition, le ratio eau sur liant et la quantité d'adjuvant fluidifiant sont sélectionnés comme paramètres de l'étude avec pour chacun, une variation sur trois niveaux. La Figure 1 détaille la configuration du plan. Celle-ci, en plus de fournir les effets de chaque facteur, permet d'avoir les interactions entre le type d'additions et les autres facteurs. La quantité totale de liant est fixée à 360 kg par mètre cube de béton. Etant donné que la quantité d'addition substituées au ciment n'est pas la même selon le type, le plan d'expériences est construit selon une valeur nominale plus ou moins 50 %.

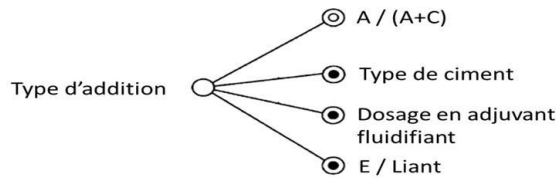


Figure 1. Schéma récapitulatif de la configuration des facteurs pour le plan d'expérience béton.

Il en va de même pour la quantité d'adjuvant utilisée avec une variation de plus ou moins 0,15 % de liant autour d'une valeur nominale. En effet, en plus de l'importante variation de la demande en eau des ciments (de 32 à 37 %), chaque addition absorbe une quantité d'eau différente, nécessitant ainsi une adaptation de la quantité d'adjuvant selon l'addition.

Dans le Tableau 3 sont détaillés les niveaux retenus pour chaque facteur (type de ciment, type d'addition, quantité d'addition, E/L et quantité d'adjuvant).

Facteurs	Niveau								
Type d'addition	Laitier			Cendre volante			Fumée de silice		
Masse d'addition pour 100 kg de ciment (kg/100 kg de ciment)	25	50	75	12,5	25	37,5	4	8	12
Type de ciment	C1			C2			C3		
E/L	0,375			0,4			0,425		
Pourcentage d'adjuvant (%)	0,3825	0,45	0,5175	0,51	0,6	0,69	0,85	1	1,15

Tableau 3. Récapitulatif des niveaux des facteurs utilisés dans le plan d'expériences.

1.4. Techniques d'analyse

Les bétons sont caractérisés :

- à l'état frais par mesure d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2,
- thermiquement par mesure de chaleurs d'hydratation par calorimètre quasi adiabatique QAB [BOU 10],
- mécaniquement par mesure de résistances mécaniques en compression sur des éprouvettes 16*32 cm selon la norme NF EN 12390-3.

4. Résultats et discussion

Dans cette partie, les résultats obtenus à la suite du plan d'expérience sont présentés puis discutés, en s'attachant particulièrement à l'état frais et à l'évolution des chaleurs d'hydratation et des résistances mécaniques au cours du temps. Un outil de formulation est aussi mis en place. Toutes les figures présentées ci-dessous se divisent en deux où les effets moyens sont en noir, et les interactions entre chaque type d'addition et les autres facteurs, sont en bleu pour l'interaction du laitier (S), en rouge pour l'interaction de la cendre volante (FA) et en vert pour l'interaction de la fumée de silice (SF). Les interactions s'interprètent en les comparant avec la tendance générale des effets. Si les évolutions sont identiques avec seulement un décalage vertical, alors il n'y a pas d'interaction entre le type d'addition et les autres facteurs. Si les tendances sont inverses alors il y a une forte interaction entre le type d'addition et les autres facteurs.

1.5. Influence des facteurs sur l'état frais

La connaissance des caractéristiques du béton à l'état frais, et particulièrement l'affaissement du béton est importante pour la mise en place de celui-ci. La Figure 2 représente les effets et interactions des différents facteurs sur l'affaissement du béton à l'état frais. De façon générale, la présence de laitier ou de cendre volante

confère au béton un affaissement important. Lorsque la fumée de silice est utilisée. Ceci est dû à la surface spécifique importante de la fumée de silice qui absorbe une grande quantité d'eau, en laissant ainsi moins disponible pour la fluidité du béton par rapport au laitier et à la cendre volante. La différence d'affaissement entre les bétons avec cendre volante et ceux avec laitier est expliquée par la surface sphérique de la cendre volante [RAM 95] contrairement à celle du laitier [BOU 07]. Plus la quantité d'addition utilisée dans le béton est importante, plus l'affaissement de celui-ci est faible, sauf lorsqu'il s'agit de fumée de silice.

Le type de ciment utilisé lors de la fabrication a aussi un effet important sur l'état frais du béton, et ce quelque soit le type d'addition même si cet effet peut être amplifié avec des additions demandeuses en eau. Ceci s'explique par les grandes variations des caractéristiques de ces ciments, et particulièrement de leur demande en eau. Plus la composition du ciment se rapproche de celle du CEM I, plus la demande en eau augmente.

De par son rôle fluidifiant, la présence d'adjuvant augmente l'affaissement du béton jusqu'à une certaine quantité. Cependant, l'effet de l'adjuvant n'est pas total car le temps de malaxage n'est pas optimisé de par la volonté de travailler en « condition chantier ». Aussi le pourcentage optimal d'adjuvant lorsqu'il est dépassé peut provoquer une ségrégation du béton.

La nature de l'addition interagit peu avec l'adjuvant, même si Bessa-Badreddine indique que plus la taille des additions diminue, plus le besoin en adjuvant est grand [BES 04]. Enfin, l'augmentation du rapport eau sur liant, par effet de dilution quelque soit l'addition, augmente l'affaissement.

1.6. Influence des facteurs sur l'évolution vers un état durci

En plus de l'étude de l'état frais, il est important de connaître la quantité de chaleur afin d'évaluer la température interne de la pièce et le risque de réaction sulfatique interne. L'analyse des résultats obtenus par mesure de chaleur QAB permet d'avoir la chaleur totale dégagée lors de l'hydratation à 41 heures cf. Figure 3 et à 144 heures cf. Figure 4. De façon générale, la présence et l'augmentation de la quantité d'additions dans le béton ont pour effet de diminuer la quantité de chaleur produite. Cet effet est malgré tout moins visible lorsque la fumée de silice est utilisée comme addition, à la fois de par la quantité substituée qui est moins importante comparée aux autres additions, mais aussi de par sa réactivité plus rapide. Le laitier et la cendre volante dégagent moins de chaleur que la fumée de silice, que ce soit à 41 h ou 144 h. En effet, matériaux pouzzolaniques, ils réagissent lentement et nécessitent une activation, alors que la fumée de silice est très réactive grâce à sa finesse et son rôle de sites de nucléation [KAD 09]. La différence de chaleur dégagée entre le laitier et la cendre volante s'amenuise avec le temps pour atteindre des valeurs équivalentes, voire supérieures pour le laitier à 144 h, ce qui est en accord avec les coefficients d'activité mesurés.

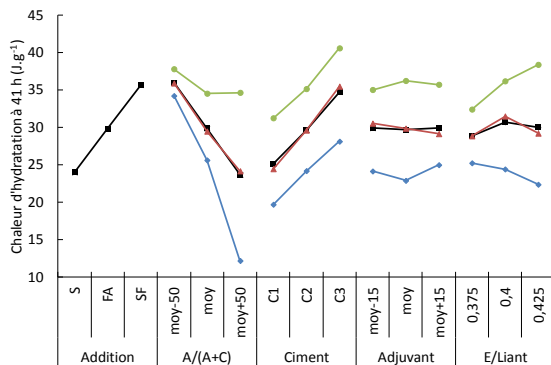


Figure 3. Graphe des effets et interactions des facteurs sur la quantité de chaleur mesurée à 41 h en QAB du béton.

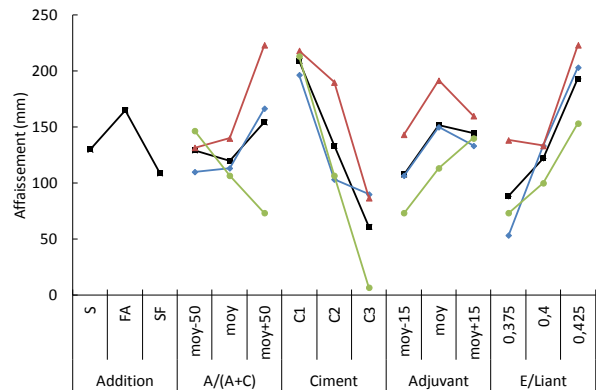


Figure 2. Graphe des effets et interactions des facteurs sur l'affaissement du béton.

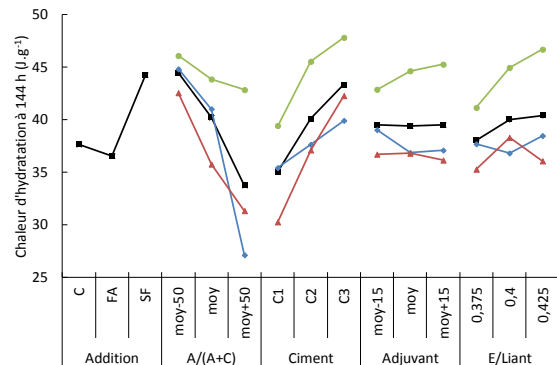


Figure 4. Graphe des effets et interactions des facteurs sur la quantité de chaleur mesurée à 144 h en QAB du béton.

Comme pour l'affaissement, les études de l'hydratation du béton à 28 jours et à 144 h (15 jours) sur la chaleur d'hydratation à 41 et à 144 h quelque soit le type d'addition utilisée. Plus la partie clinker est diluée (présence de filler calcaire), plus la chaleur dégagée est faible. Contrairement à l'affaissement, le pourcentage d'adjuvant utilisé n'a aucun effet sur le dégagement de chaleur, quels que soient l'échéance ou le type d'addition. Enfin, de manière générale, le rapport eau sur liant n'a pas d'effet au jeune âge et ne semble en avoir que très peu à 144 h. Cependant, il est possible de remarquer une légère différence d'évolution pour les bétons avec fumée de silice lorsque le rapport E/L augmente. La quantité de chaleur d'hydratation augmente avec le rapport E/L : il y a plus d'eau disponible pour les réactions d'hydratation.

En plus de la chaleur dégagée lors de l'hydratation du béton, il est intéressant d'étudier la montée des résistances en compression. Les Figure 5 et Figure 6 représentent respectivement les effets et interactions des facteurs sur les résistances en compression à 2 jours et à 28 jours.

Il est possible de faire une similitude entre les effets et interactions des chaleurs d'hydratation et ceux des résistances en compression. Ainsi, la présence de fumée de silice permet d'avoir de meilleures résistances en compression par rapport à la cendre volante et au laitier à 2 et 28 jours ce qui est en accord avec les indices d'activité mesurés. De plus, comme l'indique Pertué, ces différences de résistances au jeune âge peuvent être expliquées par les différences de cinétiques d'hydratation des additions, mises en évidence lors des mesures de chaleur [PER 08]. Cependant, de par la plus grande quantité de laitier utilisée par rapport à la cendre volante, les résistances à 2 jours des bétons avec laitier sont plus faibles que celles des bétons avec cendre volante (moins de ciment). Même si au jeune âge, il est difficile de voir une interaction entre le type de ciment et le type d'addition, les résultats à plus long terme, mettent en avant le comportement d'un couple ciment-addition avec principalement l'effet du laitier et de la fumée de silice avec les ciments.

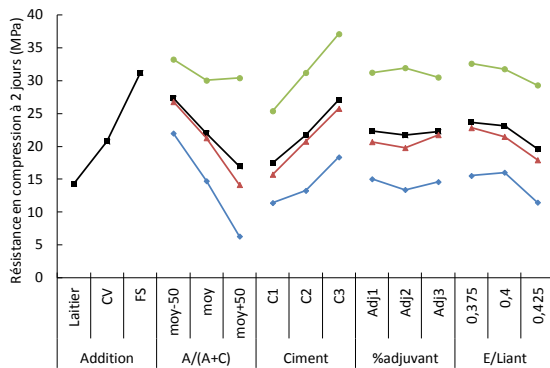


Figure 5. Graphe des effets et interactions des facteurs sur les résistances en compression à 2 jours du béton.

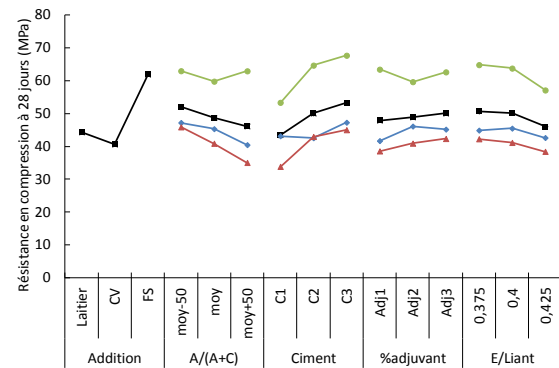


Figure 6. Graphe des effets et interactions des facteurs sur les résistances en compression à 28 jours du béton.

Les résistances diminuent avec la quantité d'addition utilisée, et ce, sans grande interaction avec le type d'addition si ce n'est pour la fumée de silice grâce à sa grande demande en eau et sa forte réactivité alors que le pourcentage d'adjuvant utilisé n'a pas d'effet sur les résistances en compression quelque soit l'âge et le type d'addition. Enfin, il est possible d'observer un léger effet de l'augmentation du rapport E/L sur les résistances en compression sans interaction avec le type d'addition. En effet, pour de faibles variations de E/L cela permet de faciliter la mise en place et donc d'avoir moins de porosité dans le matériau. Mais, lorsque ce rapport augmente trop, il y a création d'une porosité après l'hydratation du matériau ce qui a pour effet de diminuer les résistances en compression [PER 08].

1.7. Outil d'optimisation de la formulation béton

L'analyse des effets et interactions permet d'obtenir des modèles sur le domaine d'étude pour les différentes réponses mesurées selon chaque facteur. Dans notre cas, il a été décidé de ne pas prendre en compte les modèles correspondant au pourcentage d'adjuvant étant donné ses faibles effets et interactions sur les réponses mesurées. La combinaison de ces modèles permet ensuite la mise en place d'un outil de formulation béton respectant un cahier des charges établi.

Dans cette partie sont présentés les résultats de l'outil de formulation obtenus selon un cahier des charges avec la volonté de minimiser la température maximale mesurée lors de l'essai QAB.

Pourcentage d'addition selon la norme EN 206/CN NAF 1	0 < FA < 0,3 0 < SF < 0,1
Rapport E/L	0,3 < E/L < 0,6
L _{eq} (kg)	280 < L _{eq} < 400
T _{max} QAB (°C)	T _{max} min
R _c 28j pour C30 (MPa)	38 MPa

Tableau 4. Cahier des charges retenu.

Le Tableau 5, présente les différentes formulations testées. Tout d'abord, il est possible de noter que l'ajout de fumée de silice dans les bétons conduit à des résistances à 28 jours dépassant largement la résistance visée (formulation 7 à 9). Trois formulations permettent d'atteindre des résistances en compression entre 38 et 40 MPa (formulations 2, 4 et 5). Or, comme il l'a été montré précédemment, la présence de laitier dans le béton augmente la chaleur dégagée et ne permet donc pas d'atteindre la valeur optimale de température par rapport à un béton contenant de la cendre volante (écart de plus de 10 °C entre les bétons avec laitier et ceux avec cendre volante). Sur les deux bétons restant (formulations 4 et 5), c'est le béton contenant le ciment le plus substitué en filler calcaire (C1) qui permet de limiter au maximum l'échauffement thermique (28,4 °C), tout en atteignant les résistances mécaniques nécessaires (formulation 4).

N° formulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type A	S			FA			SF		
Type C	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Liant (kg)	293	293	293	303	422	303	388	388	388
A/A+C	0,40	0,40	0,40	0,30	0,30	0,30	0,10	0,10	0,10
E/L	0,30	0,30	0,30	0,43	0,43	0,60	0,30	0,30	0,30
T _{max} QAB (°C)	37,0	40,0	43,9	28,4	31,5	30,1	31,4	36,1	39,3
R _c 28j (MPa)	48,9	40,0	59,0	38,0	38,0	46,9	62,2	60,1	84,2

Tableau 5. Formulations des bétons testées.

Lorsqu'en plus de minimiser la température maximale obtenue en QAB et avoir 38 MPa à 28 jours, l'on veut atteindre 20 MPa à 2 jours, deux formulations bétons répondent aux critères avec une température maximale atteinte en QAB de 40 °C : l'une contenant du ciment moyennement dosé en filler calcaire (C2) et du laitier, l'autre contenant du ciment le plus dosé en filler calcaire (C1) et de la fumée de silice.

5. Conclusion

Grâce à ces essais, il a été possible de mettre en évidence l'effet du type et du pourcentage d'addition, de la composition du ciment, du rapport E/L et de la quantité d'adjuvant, de l'état frais - mesure d'affaissement – à l'état durci – chaleur d'hydratation et résistances mécaniques. L'affaissement du béton est influencé par le couple ciment-addition ainsi que par la quantité d'eau et d'adjuvant utilisée, permettant ainsi de défloculer les particules solides et de libérer de l'eau pour la fluidité et l'hydratation du béton. De manière générale, l'affaissement du béton augmente avec le pourcentage d'addition, mais de façon moindre avec les bétons contenant de la fumée de silice.

Une fois le béton durci, le rapport E/L et le pourcentage d'adjuvant ont peu d'effet comparé au type d'addition et de ciment sur les chaleurs d'hydratation. Plus la quantité d'addition ajoutée est grande, plus la chaleur dégagée est faible. La cinétique d'hydratation est plus rapide avec des bétons contenant de la fumée de silice que du laitier ou de la cendre volante. Concernant les résistances mécaniques, que ce soit au jeune âge ou à plus long terme, le couple ciment-addition est à prendre en compte en plus du coefficient d'activité de l'addition. L'utilisation d'un rapport E/L élevé peut être préjudiciable par rapport à la création de porosité résiduelle.

Enfin, ces essais ont permis de développer un outil de formulation qui permet d'optimiser la formulation du béton selon les facteurs limitant, que ce soit la température mesurée ou les résistances mécaniques.

6. Bibliographie

- [AFN 12] AFNOR, « NF EN 197-1 », Méthodes d'essais des ciments Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 2012.
- [AFN 14] AFNOR, « NF EN 206-1/CN », Béton. Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206-1, 2014.
- [BER 15] BERODIER E., Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2015.
- [BES 04] BESSA-BADREDDINE A., Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [BOU 07] BOUDCHICHA A., Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [BOU 10] BOULAY C., TORRENTI J.M., ANDRE J.L., SAINTILA R., Quasi-adiabatic calorimetry for concretes: Influential factors, *Bulletin du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 278, 2010.
- [CYR 00] CYR M., LAWRENCE P., RINGOT E., CARLES-GIBERGUES A., « Variation des facteurs d'efficacité caractérisant les additions minérales », *Materials and Structures*, vol 33, 2000, pages 466-72.
- [CYR 06] CYR, M., LAWRENCE P., RINGOT E., « Efficiency of mineral admixtures in mortars, Quantification of physical and chemical effects of fines admixtures in relation with compressive strength », *Cement and Concrete Research*, vol 36, 2006, pages 264-77.
- [KAD 98] KADRI E. H., Contribution à l'étude de l'influence de la fumée de silice sur les caractéristiques des bétons à hautes performances, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 1998.
- [LAW 05] LAWRENCE P., CYR M., RINGOT E., « Mineral admixtures in mortars: effet of type, amount and fineness of fine constituent on compressive strength », *Cement and Concrete Research*, vol 35, 2005, pages 1092-105.
- [LOT 11] LOTHENBACH B., SCRIVENER K., HOOTON R.D., « Supplementary cementitious materials », *Cement and Concrete Research*, vol 41, 2011, pages 1244-56.
- [PER 08] PERTUE A. Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeune et très jeune âges, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2008.
- [RAM 95] RAMACHANDRAN V.S., MORTEL N., RUDERT V.. « Concrete admixtures Handbook », *Properties, Science and Technology*, 1995.