

Etudes sur des bétons à base de liants ternaires – Focus sur la chaleur d’hydratation

Maxime Lion¹, Jérôme Pleux¹, Hugo Hérin¹, Anaïs Herluison^{1,2}

¹ EDF, Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

² Ginger CEBTP, Aix-en-Provence, France

ABSTRACT Cet article présente les résultats d’une campagne d’essais dédiée à l’évaluation de la chaleur d’hydratation de bétons à base de liants ternaires principalement. Plusieurs types d’additions ont été utilisées pour constituer les liants ternaires : fillers calcaire, cendres volantes, laitiers de haut-fourneau, métakaolins flash. Les résultats obtenus permettent d’estimer le gain obtenu sur le plan thermique, en particulier la réduction en élévation de température adiabatique (représentative de l’élévation attendue pour une pièce extrêmement massive). Des essais sur béton durci ont également été réalisés (essais de résistance à la compression, essais de sensibilité à la réaction sulfatique interne, mesures de propriétés de transfert). Ces essais permettent de compléter les données de chaleur d’hydratation et d’entrevoir une analyse croisée (gain obtenu sur le plan thermique versus variation de résistance par exemple).

Keywords bétons, exothermie, durabilité, additions

I. INTRODUCTION

Les bétons constituant les ouvrages de production d’électricité requièrent généralement une technicité particulière, en lien avec les besoins multiples auxquels ils doivent répondre (durabilité, fonctionnalité, réalisation). Les bétonnages de pièces massives sont régulièrement rencontrés et doivent faire l’objet d’une appréhension particulière ; les températures atteintes doivent être maîtrisées pour se prémunir des risques de fissuration thermique et de réaction sulfatique interne. L’usage de ciments ou liants comprenant des composés pouzzolaniques et/ou hydrauliques latents est quasi-systématique pour maîtriser l’exothermie des bétons. Ces composés ont par ailleurs la capacité de pouvoir contribuer à la prévention vis-à-vis des pathologies de gonflement. Le recours à des formules béton à base de liants ternaires (un ciment et deux additions) s’est développé dernièrement sur plusieurs chantiers, surtout à l’international (liants ciment-laitier-fumée de silice utilisés par exemple au Royaume-Uni), démontrant un intérêt réel pour ce type de solution. Depuis quelques années, de nombreux travaux concernent les ciments ou liants ternaires et permettent d’envisager des perspectives intéressantes (Rozière et al., 2018 ; Deboucha et al., 2020 ; Mounanga et al., 2011). Dans la même logique, les ciments « récents » de type CEM II/C et CEM VI devraient également porter un intérêt pour le bétonnage de pièces massives. La norme NF EN 12390-14 dédiée à la détermination de la chaleur dégagée par le béton en cours de durcissement, par méthode semi-adiabatique, est relativement récente (2018). Dans ce contexte, le

laboratoire béton d'EDF a entrepris une étude destinée à l'établissement d'une base de données relative à ce type d'essai pour différentes formulations de béton. L'étude a consisté à étudier le comportement d'une formule témoin à base de CEM I seul, à partir de laquelle plusieurs variantes à base de liants ternaires ont été testées. Quatre additions ont été utilisées (cendres volantes, métakaolin flash, laitier de haut-fourneau et fillers calcaire) pour composer les liants ternaires. Les bétons ont également fait l'objet de caractérisation à l'état durci (résistance à la compression, propriétés de transfert, évaluation de la sensibilité à la RSI après échauffement tardif).

II. PRESENTATION DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS

A. Formules étudiées

Les propriétés du ciment et des différentes additions utilisées sont synthétisées dans le Tableau 1 ; il s'agit de données fournisseurs.

TABLEAU 1. Synthèse des données fournisseurs concernant le ciment et les additions utilisées

Ciment	CEM I 52,5 Composition du clinker : $C_3S = 67\%$, $C_2S = 11\%$, $C_3A = 7\%$, $C_4AF = 10\%$ Teneur en alcalins du ciment : $Na_2O_{eq.} = 0,97\%$ Résistance à la compression à 28 jours = 60 MPa
Métakaolin flash "MK"	Indice d'activité à 28 jours > 100 % Surface spécifique BET = 15,65 m ² /g Passant à 63 µm > 70 %
Cendres volantes silico-alumineuses "V"	Indice d'activité à 28 jours de l'ordre de 85 % Indice d'activité à 90 jours > 100 % Refus à 45 µm de l'ordre de 20 %
Laitier de haut-fourneau "S"	Passant à 32 µm > 95 % Indice d'activité à 28 jours de l'ordre de 100 % Indice d'activité à 90 jours > 100 %
Fillers calcaire "L"	Teneur en CaCO ₃ = 98,6 % Indice d'activité à 28 jours = 79 % Particules < 63 µm = 99 %

La chaleur d'hydratation du ciment a été mesurée selon NF EN 196-9 sur le lot utilisé pour les études, les résultats obtenus sont : $Q_{41h} = Q_{120h} = 330$ kJ/kg. Les compositions étudiées ont consisté à se baser sur une formule de béton de référence BREF, à partir de laquelle différentes variantes, consistant à substituer une partie du ciment, ont été réalisées. L'ensemble des formules testées sont listées dans le Tableau 2. Il a été choisi d'utiliser pour le béton de référence BREF un dosage en ciment relativement élevé (460 kg/m³) de manière à atteindre dans le calorimètre une température non négligeable, dans l'optique de mieux discerner par la suite l'effet des additions. Le squelette granulaire est composé de granulats de nature siliceuse, représentant un dosage de 1635 kg/m³, avec un ratio G/S de 1,45 et un coefficient d'absorption de 0,5%. Le dosage en eau totale représente la moitié du dosage en ciment, soit un dosage de 230 kg/m³ (la quantité d'eau efficace et le ratio E_{eff}/C sont donc respectivement de l'ordre de 222 kg/m³ et 0,48). La majorité des formules étudiées est composée de liant ternaire. Un ajout de superplastifiant en faible proportion

($\approx 0,2\%$ du poids de liant) a généralement été réalisé de manière à obtenir systématiquement un affaissement de l'ordre de 200 mm.

Les liants ternaires ont été définis selon 2 principes :

- Substitution de 50% du ciment en utilisant deux additions à hauteur de 25% chacune.
- Substitution de 65% du ciment en utilisant 50% de laitier de haut-fourneau et une seconde addition à hauteur de 15%.

Deux formules ont cependant été étudiées sur la base d'un liant binaire :

- Une formule avec la substitution de 25% du ciment par le métakaolin.
- Une formule avec la substitution de 65% du ciment par le laitier de haut-fourneau.

TABLEAU 2. Dénomination des formules de bétons et composition des liants

	Ciment (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	V (kg/m ³)	S (kg/m ³)	L (kg/m ³)
BREF	460	-	-	-	-
B25MK	345	115	-	-	-
B25MK25V	230	115	115	-	-
B25S25V	230	-	115	115	-
B25L25V	230	-	115	-	115
B25MK25S	230	115	-	115	-
B25S25L	230	-	-	115	115
B25MK25L	230	115	-	-	115
B50S15MK	161	69	-	230	-
B50S15L	161	-	-	230	69
B50S15V	161	-	69	230	-
B65S	161	-	-	299	-

B. Essais réalisés

Les formules de béton ont fait l'objet de détermination de la chaleur d'hydratation selon la norme NF EN 12390-14 (méthode semi-adiabatique). Le principe consiste à mesurer l'évolution de la température dans le béton (éprouvette cylindrique 16 x 32 cm dans notre cas, soit 6,4 litres environ) en fonction du temps, puis à déterminer la chaleur cumulée à partir des propriétés thermiques calibrées des calorimètres. La norme NF EN 12390-14 précise l'ensemble de la démarche (capacités thermiques à considérer pour les constituants, calcul de la chaleur d'hydratation,...).

Ces essais ont été réalisés sur l'ensemble des formules décrites dans le Tableau 2. De plus, deux formules (B50S15MK et B65S) ont fait l'objet d'essais en conditions de température élevées (30°C) de manière à évaluer leur énergie d'activation. La résistance à la compression a également été mesurée sur toutes les formules de béton selon NF EN 12390-3 aux échéances suivantes : 7 jours, 28 jours et 90 jours. En complément, des essais axés durabilité ont été réalisés à partir d'éprouvettes conservatoires âgées d'un an :

- Mesure de la fréquence de résonance (appareil Grindosonic) après échauffement à 85°C en condition humide (HR > 95%) pendant 2 jours puis remise en eau, dans le but d'évaluer la sensibilité des bétons à générer une réaction sulfatique interne.

- Mesures des propriétés de transfert sur 8 formules : coefficient de diffusion apparent des ions chlorures selon XP P18-462 et mesure de la perméabilité à l'eau par séchage selon un protocole interne (Lion et al., 2018).

III. RESULTATS DE CHALEUR D'HYDRATATION ET DE RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les résultats de chaleur d'hydratation sont fournis dans le Tableau 3, en se basant sur les résultats à 41 heures et 144 heures (Bourchy, 2018). A noter que les valeurs données ici sont retranscrites en fonction de la quantité de liant ; ce qui permet de faciliter la comparaison avec la chaleur d'hydratation mesurée sur le ciment seul, sachant que les formules de béton testées contiennent systématiquement la même quantité de liant (460 kg/m³).

TABLEAU 3. Chaleurs d'hydratation mesurées pour les 12 formules testées

	Q41h (kJ/kg de liant)	Q144h (kJ/kg de liant)
BREF	332	331
B25MK	320	318
B25MK25V	244	257
B25S25V	211	246
B25L25V	190	212
B25MK25S	253	257
B25S25L	212	244
B25MK25L	240	247
B50S15MK	171	195
B50S15L	157	225
B50S15V	159	220
B65S	164	224

On remarque que la chaleur d'hydratation mesurée sur le béton de référence est du même ordre de grandeur que celle mesurée sur le ciment. La substitution de 25% du ciment par du métakaolin ne modifie pas l'ordre de grandeur de la chaleur d'hydratation, ce qui est cohérent avec les données de la littérature (Bucher, 2015). On peut noter des valeurs à 144 heures très légèrement inférieures à celles obtenues à 41 heures, ce qui provient de l'incertitude liée au calcul de la chaleur d'hydratation et témoigne dans ce cas d'une stabilisation de la chaleur d'hydratation entre 41 et 144 heures.

Pour les autres formules, on note une diminution de la chaleur d'hydratation mesurée, dans des proportions variables. La Figure 1 montre des exemples de températures mesurées dans les calorimètres. La température maximale atteinte par le béton BREF est de 60°C alors qu'elle est plutôt de l'ordre de 40-45°C pour d'autres formules.

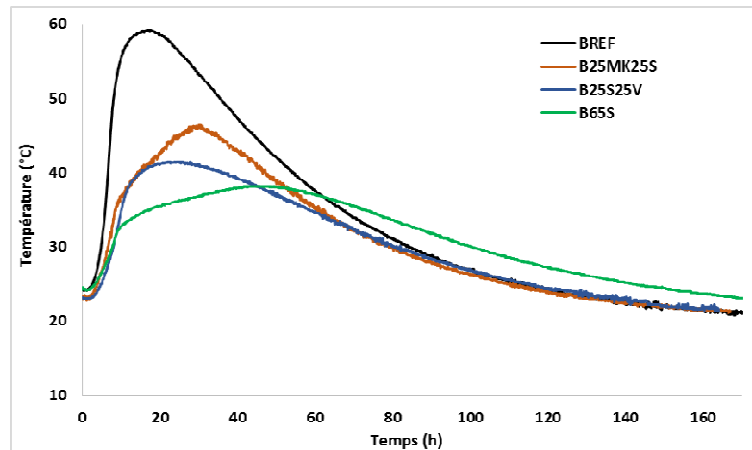


FIGURE 1. Exemples de températures mesurées dans les calorimètres

La Figure 2 montre les températures mesurées pour les 2 formules ayant fait l'objet d'essais à 30°C. On constate un écart non négligeable au niveau des températures maximales atteintes en comparaison avec les essais réalisés à 20°C – de l'ordre de 15°C - ce qui démontre l'importance de la thermo-activation pour les formules concernées. L'application de la méthode de superposition a permis d'estimer l'énergie d'activation de ces bétons : des valeurs (E_a/R) de 8000 K et 8500K sont obtenues respectivement pour B65S et B50S15MK.

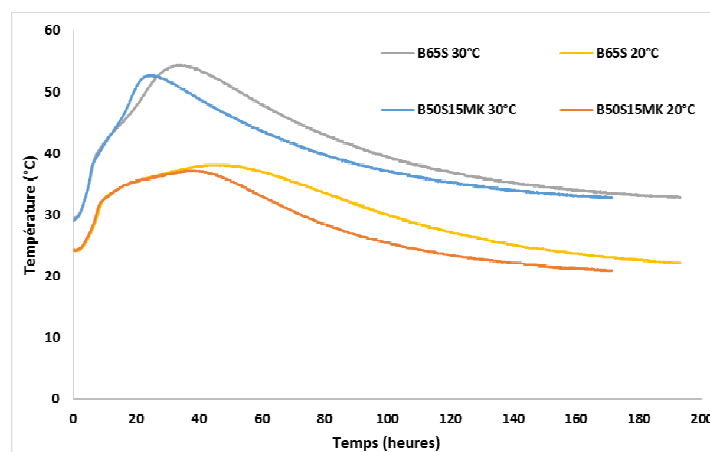


FIGURE 2. Températures mesurées dans les calorimètres pour les 2 bétons testés à 30°C

Concernant les essais de résistance à la compression, la Figure 3 illustre l'ensemble des résultats obtenus sur la base du ratio entre la résistance mesurée sur un béton donné et celle mesurée sur le béton de référence BREF (les valeurs de référence étant : $R_{c\ 7j} = 35,4$ MPa ; $R_{c\ 28j} = 44,3$ MPa ; $R_{c\ 90j} = 48,8$ MPa).

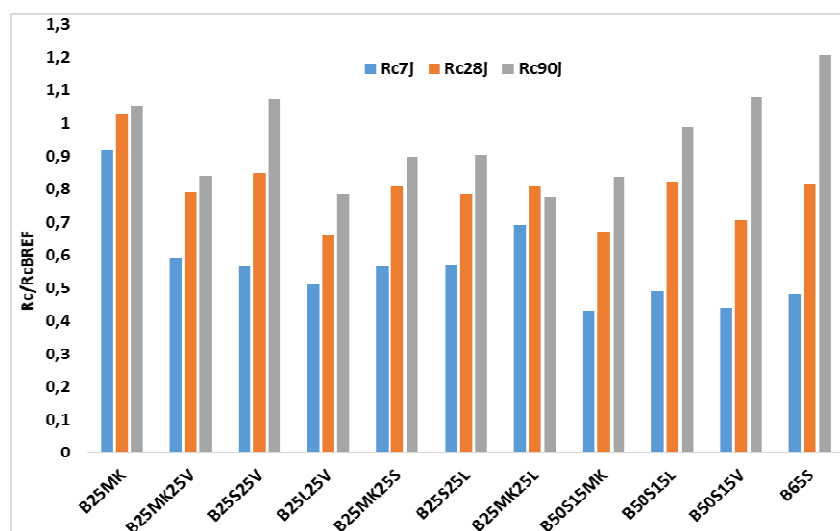


FIGURE 3. Résultats de résistance à la compression (ratio résistance du béton concerné / résistance du béton de référence)

On note que les résistances à 7 jours peuvent être nettement plus faibles que celles du béton de référence, en particulier dans le cas de substitution importante du ciment. Les résistances à 28 jours sont comprises entre 65 et 100% de la résistance du béton de référence, et les résistances à 90 jours sont comprises entre 75 et 120%. La résistance à la compression faisant habituellement l'objet d'exigences contractuelles ; il est intéressant de situer sa variation en lien avec la nature du liant au regard des gains potentiels en terme d'élévation de température adiabatique (élévation de température pouvant être atteinte au sein d'une pièce extrêmement massive). Pour ce faire, il est proposé une approche pragmatique consistant à calculer dans un premier temps l'élévation de température adiabatique à 144 heures à partir des valeurs Q_{144h} mesurées (Bourchy, 2018). Etant donné que la chaleur d'hydratation à 144 heures ne représente pas forcément la chaleur adiabatique à l'infini, il est proposé une correction en s'inspirant du guide technique (Ifstarr, 2017) : majoration de 5% pour les bétons BREF et B25MK et de 15% pour les autres. Les valeurs obtenues, ainsi que le gain en élévation de température adiabatique (ratio $\Delta T / \Delta T_{BREF}$), sont synthétisés dans le Tableau 4. Cette démarche peut être sujette à certaines critiques dans la mesure où elle ne distingue pas forcément la nature des liants concernés. Elle a cependant l'avantage d'apporter en première approche des ordres de grandeur définis de manière conservative. La Figure 4 illustre le gain en élévation de la température adiabatique en fonction de la variation des résistances à la compression mesurées à 28 et 90 jours. Pour les résistances à 28 jours (échéance contractuelle courante), on observe que les pertes de résistance sont globalement du même ordre de grandeur que le gain en élévation de température adiabatique. Ce constat est le même pour une partie des bétons en considérant les résistances à 90 jours, sauf pour 5 formules qui s'écartent de cette tendance : les bétons B25S25V, B50S15L, B50S15V et B65S dont le gain en élévation de température adiabatique est de l'ordre de 20-25% alors que les résistances sont égales ou supérieures à celles du béton de référence, et le béton B50S15MK qui bénéficie d'un gain en élévation de température adiabatique de l'ordre de 35% tout en ne subissant qu'une perte de résistance limitée de l'ordre de 15%.

TABLEAU 4. Elévations de température estimées

	Elévation de température adiabatique calculée à 144 heures	Elévation de température adiabatique estimée à l'infini (ΔT)	Ratio $\Delta T / \Delta T_{BREF}$
BREF	59,5°C	62,5°C	-
B25MK	56,4 °C	59,2 °C	0,95
B25MK25V	46,3 °C	53,3 °C	0,85
B25S25V	44,6 °C	51,3 °C	0,82
B25L25V	38,2 °C	44,0 °C	0,70
B25MK25S	46,0 °C	52,9 °C	0,85
B25S25L	43,7 °C	50,3 °C	0,80
B25MK25L	44,6 °C	51,3 °C	0,82
B50S15MK	34,7 °C	39,9 °C	0,64
B50S15L	40,1 °C	46,1 °C	0,74
B50S15V	40,0 °C	46,0 °C	0,74
B65S	40,1 °C	46,1 °C	0,74

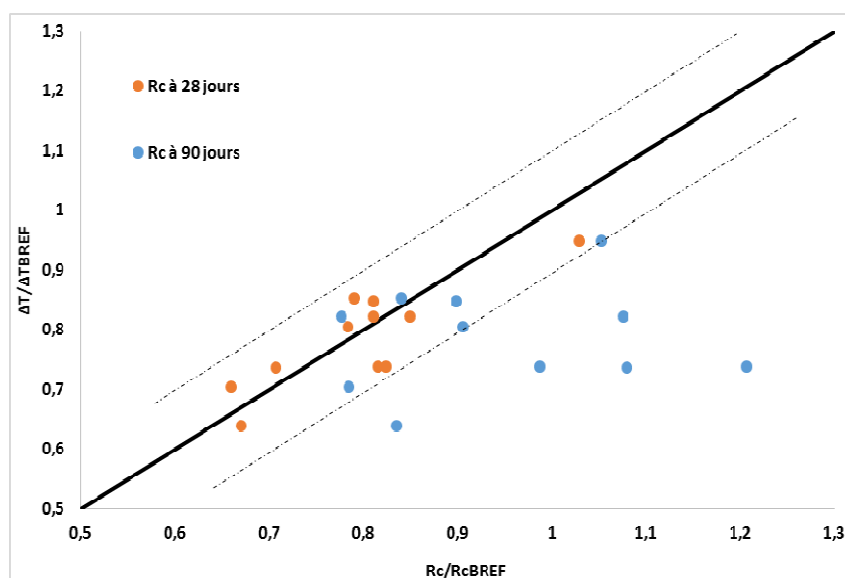


FIGURE 4. Réduction en élévation de température adiabatique versus variation de résistance à la compression

IV. RESULTATS DES ESSAIS AXES DURABILITE

Le suivi de la fréquence de résonance des éprouvettes de béton préalablement soumises à un échauffement tardif est présenté dans la Figure 5. Le ratio des fréquences de résonance au carré ($f(t)^2/f_0^2$) permet d'exprimer l'évolution du module d'élasticité dynamique, f_0 représentant la fréquence de résonance avant échauffement (cette option permet de faire apparaître l'impact de l'échauffement). On observe que le béton BREF voit son module chuter rapidement et

brutalement, témoignant de l'ampleur de développement de la RSI et de l'expansion induite (non mesurée dans le cas présent). Aucun autre béton ne reproduit ce comportement, ce qui révèle les bénéfices apportés par les substitutions au ciment concernées. Une grande partie des formules voit leurs modules recouvrer leurs valeurs d'origine, témoignant d'une insensibilité aux échauffements tardifs réalisés. Certains bétons ont cependant un comportement particulier :

- Les bétons B25S25L et B25L25V voient leurs modules stabiliser à un ratio de l'ordre de 0,9.
- Les bétons B25MK et B25MK25L voient leurs modules stabiliser à un ratio de l'ordre de 0,8. Pour le béton B25MK, une très légère diminution préalable à la stabilisation est aperçue.

Pour ces bétons, il semble que des transformations irréversibles ont pu prendre part lors de l'échauffement tardif et/ou lors de la remise en eau. Ces phénomènes sont sans commune mesure avec les phénomènes rencontrés pour le béton de référence. Des analyses complémentaires - observations MEB en particulier - permettraient de mieux comprendre la raison de ces comportements particuliers.

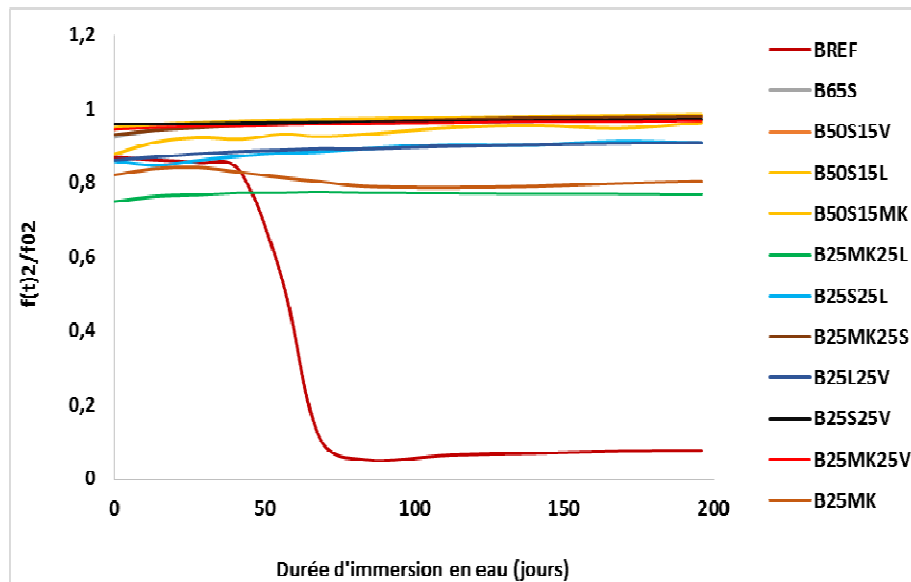


FIGURE 5. Suivi en fréquence de résonance lors de la remise en eau

Concernant les propriétés de transfert, la Figure 6 présente les résultats obtenus pour les coefficients de diffusion apparents des ions chlorure. On note que la substitution du ciment par 25% de métakaolin, seul ou couplé au filler calcaire, permet de réduire le coefficient de diffusion d'un facteur de l'ordre de 3 (bétons B25MK et B25MK25L). Pour les autres bétons testés, le facteur de réduction est supérieur à 10 ; en lien avec les plus grandes quantités d'addition à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent.

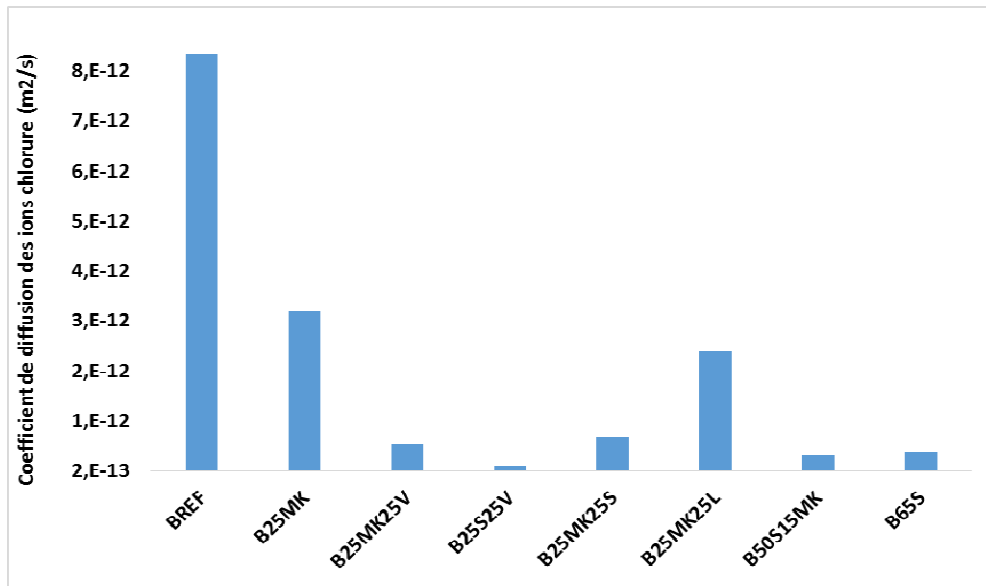


FIGURE 6. Coefficients de diffusion apparents des ions chlorure

Les mesures de perméabilité à l'eau par séchage ont permis de déterminer une valeur de l'ordre de 5.10^{-20} m²/Pa.s pour le béton de référence BREF. Cet ordre de grandeur est également obtenu pour d'autres formules : B25MK, B25MK25V, B25MK25S et B25MK25L. Les mesures mettent en évidence une réduction notable de perméabilité à l'eau pour les bétons suivants : B50S15MK (réduction d'un facteur 2 environ), B25S25V et B65S (réduction d'un facteur 5 environ). La Figure 7 illustre ces tendances à travers les courbes de perte de masse obtenues.

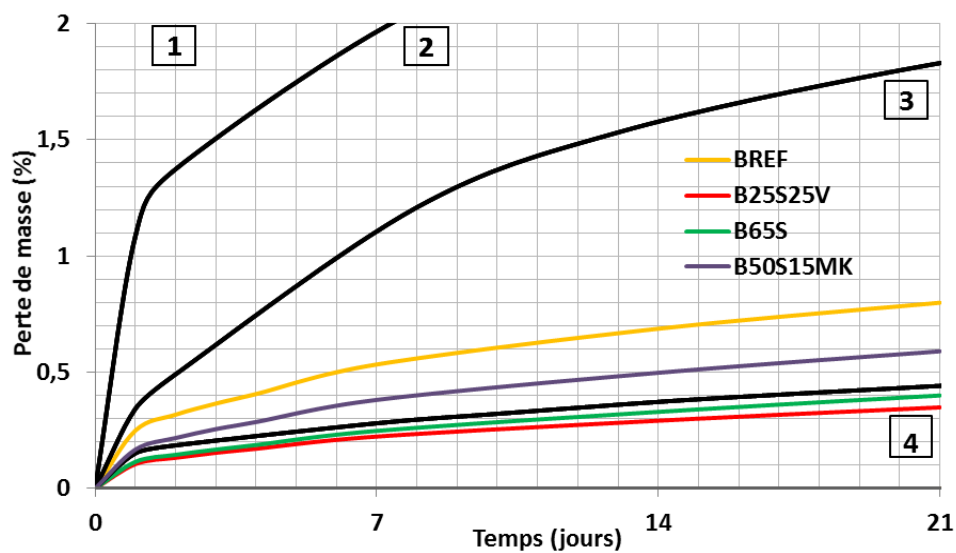


FIGURE 7. Exemples de courbes de perte de masse obtenues - Interprétation graphique (zone 1 : $Keau > 1.10^{-18}$ m²/Pa.s ; zone 2 : 1.10^{-19} m²/Pa.s < $Keau < 1.10^{-18}$ m²/Pa.s ; zone 3 : 1.10^{-20} m²/Pa.s < $Keau < 1.10^{-19}$ m²/Pa.s ; zone 4 : $Keau < 1.10^{-20}$ m²/Pa.s)

V. CONCLUSIONS

Cet article a présenté l'étude de plusieurs formules de béton, principalement à base de liants ternaires, focalisée sur le comportement thermique à travers la détermination de la chaleur d'hydratation. Les résultats obtenus permettent d'enrichir les données à disposition, ce qui présente un intérêt premier dans la mesure où elles sont peu disponibles dans la littérature (probablement du fait de la normalisation relativement récente de la méthode d'essai). La réalisation d'essais sur des formules de béton composées de liants variés a permis en outre de mettre en avant les gains potentiels en terme d'élévation de température selon la nature du liant. Les effets de la nature du liant sur la résistance à la compression ainsi que sur certaines propriétés de durabilité ont également été appréhendés. Les propriétés de durabilité sont généralement améliorées pour les bétons testés et la résistance à la compression, même si elle peut faire l'objet de réduction, reste convenable, en particulier à l'échéance de 90 jours. On notera certaines limites de cette étude (un seul ratio Eau/Liant étudié, proportions d'additions pas forcément modulées selon leur nature, un seul ciment utilisé) qui imposent certaines précautions quant à la généralisation de l'ensemble des tendances observées.

REFERENCES

- E. Rozière, G. Medjigbodo, L. Izoret & A. Loukili (2018). Mélanges ternaires à base d'argile calcinée : hydratation et durabilité. *Conférence NoMaD 2018*.
- W. Deboucha, N. Leklou, A. Khelidj, O. Plé & U.J. Alengaram (2020). Combination effect of limestone filler and slag on delayed ettringite formation in heat cured mortar, *Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 32, pp. 04019365*.
- P. Mounanga, M. Khoktar, R. El Hachem & A. Loukili (2011). Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler. *Materials and Structures, Vol. 44, 437 – 453*.
- A. Bourchy (2018). Relation chaleur d'hydratation du ciment : montée en température et contraintes générées au jeune âge du béton. *Thèse de doctorat, Université Paris-Est*.
- R. Bucher (2015). Vers une utilisation rationnelle des métakaolins flash : application aux bétons. *Thèse de doctorat. Université de Toulouse*.
- Ifsttar (2017). Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne. *Guide Technique Ifsttar*.
- M. Lion & J. Sanahuja (2018). Perméabilité à l'eau – Développement d'une méthode d'essai alternative par séchage. *Conférence NoMaD 2018*.