

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

PRÉVENTION DES DÉSORDRES LIÉS À L'ALCALI-RÉACTION DANS LE BÉTON : EFFET BÉNÉFIQUE D'UNE PLUS FORTE PROPORTION DE CENDRES VOLANTES

LION Maxime^A, PLAY Alain^A, GUILLOT Xavier^B, IZORET Laurent^B

A Electricité De France (EDF), Direction Industrielle, Département TEGG, Aix-en-Provence, France

B Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH), France

Résumé : L'intérêt d'augmenter la proportion de cendres volantes jusqu'à 45 % de liant dans les bétons contenant des granulats réactifs est apprécié dans cette étude en prévention des risques liés à l'alcali-réaction. Les expansions de quatorze bétons, contenant, soit du ciment de clinker Portland (CEM I) seul ou avec des cendres volantes (30 % et 45 % du liant), soit du ciment au laitier de haut fourneau (CEM III), sont comparées en utilisant un mélange granulaire reconnu réactif. L'essai de performance NF P18-454 vis-à-vis de l'alcali-réaction, prolongé ici sur deux ans, montre que l'expansion des bétons est réduite à un niveau non préjudiciable grâce aux cendres volantes. L'effet bénéfique observé avec les cendres volantes est d'autant meilleur que leur quantité est élevée (45 %), quelle que soit la teneur en alcalins actifs des bétons entre 1,9 kg/m³ et 4,0 kg/m³. Ainsi lorsque certains facteurs peuvent être aggravants vis-à-vis de l'alcali-réaction, en particulier la forte réactivité des granulats disponibles, il paraît souhaitable d'augmenter la proportion de cendres volantes au-delà des 30 % autorisés par la norme NF EN 206/CN pour le liant équivalent à base de CEM I, ou d'utiliser des ciments contenant des cendres volantes (CEM II/B-V, CEM IV ou CEM V).

Mots-clés : alcali-réaction, prévention, cendre volante, béton

1. INTRODUCTION

De nombreuses études ont déjà mis en évidence l'effet positif des cendres volantes en addition dans le béton pour la prévention des désordres liés à l'alcali-réaction (Malvar et al., 2006 ; Gholizadeh et al., 2015). En particulier, une étude menée pendant cinq ans par EDF (Play et al., 2003) a montré que les cendres volantes diminuaient significativement les phénomènes d'expansion. Toutefois, avec certains granulats particulièrement réactifs, l'expansion n'était réduite que de moitié avec une substitution partielle du ciment limitée à 30 %.

Certaines études soulignent l'effet bénéfique de plus grandes quantités de cendres volantes sur le niveau de réduction de l'expansion des bétons (Alasali et al., 1991 ; Lindgard et al., 2016).

Afin de confirmer ces conclusions, des formules comprenant jusqu'à 45 % de cendres volantes ont été testées dans cette nouvelle étude avec un mélange granulaire reconnu réactif. Ce type d'étude porte également un intérêt pour EDF du point de vue de la doctrine technique avec en particulier la volonté de faire évoluer ses prescriptions de prévention vis-à-vis de l'alcali-réaction pour mieux tenir compte de paramètres clés comme la proportion d'additions minérales (cendres volantes, laitiers de haut-fourneaux,...) et la teneur en alcalins actifs du béton.

2. PROGRAMME

L'étude porte sur des bétons contenant respectivement 0 %, 30 % et 45 % de cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1, utilisées en substitution partielle de ciment CEM I.

La teneur en alcalins actifs (Na_2O équivalent actif) de ces bétons a été ajustée à $1,9 \text{ kg/m}^3$ - $2,6 \text{ kg/m}^3$ - $3,3 \text{ kg/m}^3$ et $4,0 \text{ kg/m}^3$, par ajout de soude dans l'eau de gâchage.

Deux bétons constitués de ciment CEM III et dosés respectivement à $1,9 \text{ kg/m}^3$ et $3,3 \text{ kg/m}^3$ d'alcalins ont également été testés à titre de comparaison. Il a été décidé de porter la quantité maximale de cendres volantes à 45 % afin de vérifier si l'effet bénéfique des cendres, déjà constaté lors de la précédente étude (Play et al., 2003) avec un taux de substitution de 30 %, pouvait être encore optimisé pour une combinaison particulièrement réactive de granulats. Deux laboratoires (A et B) ont effectué les essais. Afin de valider les résultats obtenus par le laboratoire A, la plupart des essais ont été reproduits par le laboratoire B. L'efficacité des cendres a été évaluée en comparant les expansions des bétons soumis à l'essai de performance vis-à-vis de l'alcali-réaction selon la norme NF P18-454 (bétons conservés à 60°C et 100 % d'humidité relative). La qualification des formules de béton testées repose sur les critères d'expansion mentionnés dans le fascicule de documentation FD P18-456.

3. MATÉRIAUX UTILISÉS

Pour le choix des granulats, cette étude s'est inspirée des travaux de Monnin (Monnin, 2005) qui ont mis en évidence une combinaison particulièrement réactive de sable et de gravillon : la combinaison composée d'un sable calcaire siliceux réactif et d'un gravillon calcaire non réactif. Dans ces travaux, l'expansion la plus élevée avait en effet été observée avec un sable classé Potentiellement Réactif (PR) et un gravillon classé Non Réactif (NR) et non pas avec une combinaison de granulats tous réactifs. L'étude avait en outre montré que le mélange sable calcaire siliceux PR – gravillon calcaire siliceux PR pouvait atteindre une expansion maximale à 35 semaines alors que le mélange sable PR – gravillon NR présentait encore un gonflement résiduel potentiel à cette échéance. La combinaison réactive « sable calcaire siliceux PR et gravillon calcaire NR » a donc été sélectionnée à partir de ces résultats antérieurs. Les caractéristiques des granulats utilisés pour cette étude sont reportées dans le tableau 1.

D'après les observations de microscopie optique sur lame mince (figure 1), la silice réactive du sable apparaît sous trois formes distinctes :

- Des plages réduites de calcaire plus ou moins silicifié, contenant du micro quartz en puzzle (forme de silice secondaire la plus abondante dans ce sable) ;
- Des plages peu nombreuses de quartz en assemblage palissadique ;
- Quelques sphérules de silice fibreuse de type calcédoine (non visibles sur la figure 1).

	Sable 0/4 mm	Gravillons 4/12 mm et 12/20 mm
Type de roche	calcaire siliceux	calcaire
Réactivité vis-à-vis de la réaction alcali-silice (FD P 18-542)	PR	NR
Masse volumique (Mg/m ³)	2,61	2,67
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0,6	0,4
Perte au Feu à 975 °C (%)	36,24	43,30
SiO ₂ (%)	14,17	0,96
Al ₂ O ₃ (%)	1,79	0,25
CaO (%)	44,41	54,72
MgO (%)	1,23	1,08
SO ₃ total (%)	0,98	0,16
Na ₂ O (%)	0,0057	0,0004
K ₂ O (%)	0,0053	0,0011
Na ₂ O Equivalent (%)	0,0092	0,0011

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques des granulats utilisés.

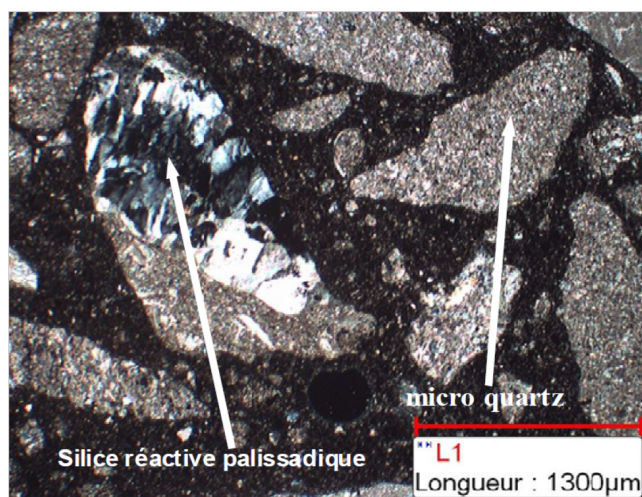


Figure 1. Grains de sable composé d'un calcaire micritique localement silicifié (image de microscopie optique en lumière polarisée sur lame mince).

Les ciments utilisés dans cette étude sont un CEM I 52,5 N CE CP2 NF et un CEM III/A 42,5 N CE PM-ES-CP1 NF (62 % de laitier) contenant respectivement 0,58 % et 0,42 % de Na₂O équivalent actif. Le CEM III a été choisi car il est constitué de plus de 60 % de laitier, conformément aux recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction (FD P 18-464, 2014). Le lot de cendres volantes silico-alumineuses provient d'une centrale thermique à charbon d'EDF. Ces cendres sont représentatives de la production au moment de cette étude (avant qu'une campagne d'optimisation n'ait été menée par EDF conduisant à la production de cendres plus réactives) et sont conformes à la norme NF EN 450-1. Les principales propriétés de la cendre utilisée dans cette étude sont les suivantes :

- Masse volumique absolue de 2,25 g/cm³, surface spécifique Blaine de 3300 cm²/g, refus sur tamis à 45 µm de 34,5 % ; indices d'activité de 0,78 et 0,89 à 28 et 90 jours respectivement ;
- Teneur en SiO₂ de 49,48 %, teneur en Al₂O₃ de 29,17 %, teneur en Fe₂O₃ de 6,23 %, teneur en CaO de 5,52 %, teneur en MgO de 2,08 %, teneur en SO₃ de 0,64% et perte au feu à 975°C de 2,2 % ;
- Teneur en SiO₂ réactif de 36,45 %, teneurs en CaO réactif de 5,07 % et en CaO libre de 0,35 % ;
- Teneur en Na₂O équivalent total de 1,38 % et teneur en Na₂O équivalent actif de 0,23 %.

4. FORMULES DE BÉTON TESTÉES

Quatorze formules de bétons ont été testées (tableau 2). Un bilan de la quantité d'alcalins actifs a été effectué conformément à l'annexe A de la norme NF P18-454. La teneur en alcalins actifs du béton a été ajustée initialement par l'ajout de pastilles de soude dans l'eau de gâchage de manière à obtenir des valeurs comprises entre 1,9 kg/m³ et 4,0 kg/m³. Cette gamme a permis de comparer les expansions des bétons en fonction des teneurs en alcalins. Pour les bétons contenant des cendres volantes, une partie du ciment a été substituée de façon à obtenir un rapport [cendres / (cendres + ciment)] de 0,30 et de 0,45. Afin de tester des bétons comparables du point de vue des performances mécaniques, la teneur en liant équivalent a été maintenue constante à 300 kg/m³ (calculée avec k = 0,4 en se référant à la norme NF EN 206/CN) dans tous les bétons. L'eau efficace a été fixée à 180 kg/m³. Les formulations ont été établies en se basant sur le concept de liant équivalent autorisé jusqu'à 30 % de cendres volantes d'après la norme NF-EN 206/CN et extrapolé à 45 % pour cette étude. Un affaissement cible de 150 mm a été obtenu par ajout d'un plastifiant. Les résistances à 28 jours des bétons avec les cendres volantes sont comparables à celles des bétons avec le CEM I seul, confirmant ainsi la validité des hypothèses de formulation.

Type de liant	CEM I				CEM I + cendres volantes								CEM III/A	
Rapport [A/(A+C)]	0				0,30				0,45				0	
Teneur en alcalins actifs des bétons (kg/m ³)	1,9	2,6	3,3	4,0	1,9	2,6	3,3	4,0	1,9	2,6	3,3	4,0	1,9	3,3
N° de formule	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ciment (kg/m ³)	300				256				226				300	
Cendre (kg/m ³)	0				110				185				0	
Liant eq.	300				300				300 (265)*				300	
0/4 mm (kg/m ³)	856				803				780				835	
4/12mm (kg/m ³)	637				597				581				621	
12/20mm (kg/m ³)	425				398				387				414	
Eau efficace (kg/m ³)	180				180				180				180	
Rc à 28j (MPa)	46	n.d.	n.d.	39,5	44	n.d.	n.d.	38,5	46	n.d.	n.d.	39,5	37,5	n.d.
Rc à 90j (MPa)	48	n.d.	n.d.	44	53	n.d.	n.d.	48	56	n.d.	n.d.	47,5	42	n.d.

Tableau 2 : Formules et propriétés des bétons testés (n.d. : non déterminé, C : quantité de ciment, A : quantité de cendres volantes, * : Leq strictement selon NF EN 206/CN).

5. ESSAIS RÉALISÉS

Ces quatorze formules de béton ont été testées selon le mode opératoire de l'essai de performance (norme NF P18-454). Cet essai est réalisé sur des prismes 70 mm x 70 mm x 282 mm équipés de plots de mesures en inox et conservés durant tout l'essai dans des réacteurs spécifiques qui garantissent une température régulée à (60 ± 2) °C et 100 % d'humidité relative. A partir de la mesure initiale réalisée juste après le démoulage des prismes, la norme prévoit des mesures de variations dimensionnelles à 4, 8, 10 et 12 semaines, puis toutes les quatre semaines jusqu'à 20 semaines. Afin de vérifier l'effet bénéfique des cendres à plus long terme, les essais ont été poursuivis jusqu'à 110 semaines, soit plus de deux ans.

Le fascicule de documentation FD P18-456 précise qu'une formule de béton avec un ciment CEM I seul, donc sans addition, est considérée comme apte à l'emploi si le gonflement mesuré est inférieur à un seuil S1 de 0,02 % à 3 mois (soit 12 semaines par convention). Pour les autres types de ciments et les mélanges ciment / addition minérale, un seuil S2 de 0,02 % est fixé à 5 mois (soit 20 semaines par convention) ou un seuil S3 de 0,03 % à 52 semaines. EDF préconise dans ses clauses techniques de 2004 pour les ouvrages de génie civil un critère plus sévère : le seuil EDF est de 0,02 % à 9 mois (40 semaines par convention), indépendamment de la composition du béton.

La comparaison des critères et des valeurs seuils est donnée ci-dessous :

- Critères selon FD P18-456 :
 - Seuil S1 avec CEM I seul : expansion < 0,02 % à 12 semaines
 - Seuils S2 ou S3 avec autres liants : expansion < 0,02 % à 20 semaines ou < 0,03 % à 52 semaines
- Critère selon CCTG EDF de 2004 :
 - Seuil EDF : expansion < 0,02 % à 40 semaines

6. RÉSULTATS DES ESSAIS SUR BÉTON

6.1 Séries témoin soumises à l'essai performance

Pour les bétons à base de ciment CEM I seul (sans addition de cendres) et testés dans le laboratoire A, les gonflements augmentent selon le taux d'alcalins actifs des bétons avec un effet de seuil entre 3,3 kg/m³ et 4,0 kg/m³ notable dès les premières semaines (figure 2). Avec ce mélange granulaire réactif, le gonflement des éprouvettes est nettement supérieur au seuil de qualification S1 lorsque le taux d'alcalins actifs dépasse 3,3 kg/m³. Il est à noter que les expansions des bétons contenant des quantités d'alcalins actifs comprises entre 1,9 kg/m³ et 3,3 kg/m³ restent proches des seuils de qualification spécifiés. A titre de comparaison, les bétons à base de ciment CEM III seul, testés dans le laboratoire B, montrent un gonflement deux à trois fois plus faible pour les mêmes teneurs en alcalins (figure 2). Ces expansions restent nettement inférieures aux seuils de qualification spécifiés.

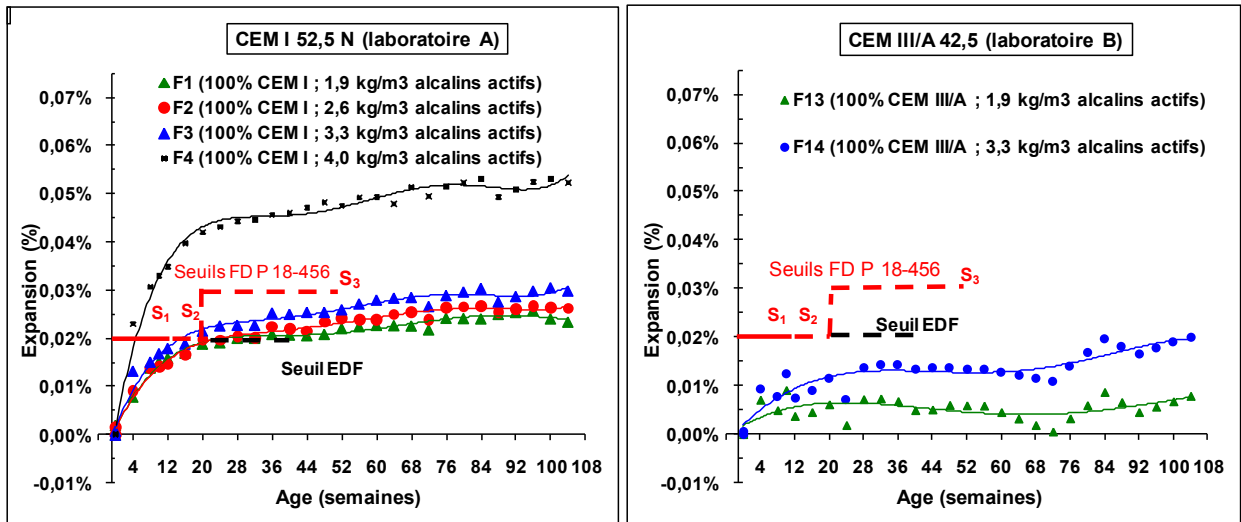


Figure 2 : Expansion des bétons « témoin »
(à gauche : CEM I 52,5 N - laboratoire A, à droite : CEM III/A 42,5 - laboratoire B).

6.2 Séries test soumises à l'essai performance

Les résultats du laboratoire A sont présentés dans la figure 3. Les expansions des éprouvettes de béton en fonction de la quantité de cendres volantes ajoutée en substitution du CEM I sont données respectivement pour quatre valeurs d'alcalins actifs : 1,9 kg/m³ - 2,6 kg/m³ - 3,3 kg/m³ - 4,0 kg/m³.

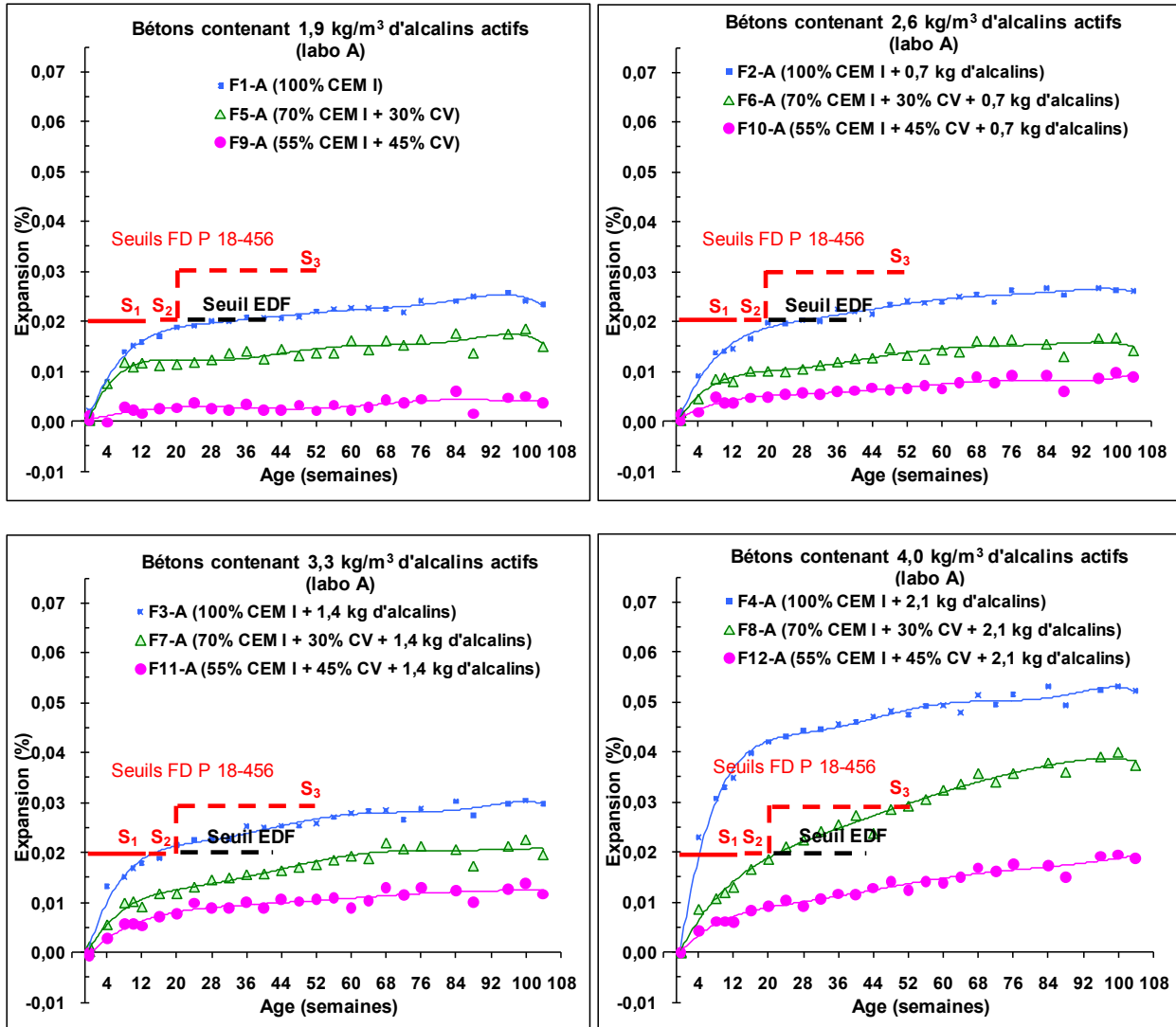


Figure 3. Expansions des bétons mesurées par le laboratoire A (teneurs variables en cendres volantes et en alcalins actifs).

L'ensemble des courbes montre que pour les quatre teneurs en alcalins actifs, l'utilisation de cendres volantes en substitution partielle du CEM I diminue fortement le gonflement des bétons. Pour les bétons comportant des quantités d'alcalins comprises entre 1,9 kg/m³ et 3,3 kg/m³, l'expansion du béton à base de CEM I seul se situe à la limite du seuil S1 et au-dessus du seuil EDF. Comme supposé, un taux de substitution de 30 % de cendres volantes permet de réduire significativement les gonflements des bétons qui se situent ainsi bien en dessous des seuils. Les courbes montrent également qu'un taux plus important de cendres (45 %) permet de réduire davantage l'expansion, la rendant très faible vis-à-vis des limites admissibles. L'effet bénéfique des cendres est particulièrement marqué pour les bétons contenant 4 kg/m³ d'alcalins actifs et pour un dosage en cendre de 45%. Le béton contenant le CEM I seul présente une forte expansion qui dépasse très largement les seuils de qualification. L'introduction de 30 % de cendres volantes permet de réduire significativement le gonflement du béton au niveau des seuils S2 et

S3, dépassant toutefois le seuil EDF plus restrictif. Avec 45 % de cendres volantes, l'expansion du béton est encore plus faible et reste très nettement inférieure à toutes les limites de qualification. Tous ces résultats confirment que l'expansion des bétons est systématiquement d'autant plus faible que la quantité de cendres volantes introduite est plus élevée. La figure 4 présente l'évolution de l'expansion à 20 semaines et à 2 ans en fonction de la proportion de cendres volantes pour les différents teneurs en alcalins actifs de l'étude. A 20 semaines, la diminution de l'expansion est linéairement proportionnelle à la quantité de cendres volantes incorporée. Pour des teneurs en alcalins actifs comprises entre 1,9 kg/m³ et 3,3 kg/m³, les droites sont quasiment superposées. Seule la droite des bétons contenant 4 kg/m³ d'alcalins actifs présente une pente plus importante, ce qui traduit une efficacité encore plus marquée des cendres vis-à-vis de la réaction alcali-silice pour ces formules de béton. A 20 semaines, l'expansion des bétons contenant 45 % de cendres volantes est faible, quelle que soit la quantité d'alcalins actifs. La teneur en alcalins actifs dans le béton devient donc moins pénalisante lorsque des cendres volantes sont introduites en quantité suffisamment importante. Pour une quantité donnée d'alcalins, la proportion de cendres volantes à ajouter en substitution du ciment peut donc être ajustée en fonction de la réactivité du mélange granulaire. Cet ajustement permettrait de respecter les critères de qualification d'une formule de béton vis-à-vis de la réaction alcali-silice tout en conservant des performances mécaniques comparables (tableau 2). A l'échéance de 2 ans, les tendances observées pour les bétons contenant 1,9 kg/m³, 2,6 kg/m³ et 3,3 kg/m³ d'alcalins actifs sont similaires à celles obtenues à l'échéance de 20 semaines. Ceci n'est pas étonnant dans la mesure où pour ces trois taux en alcalins, l'essentiel de l'expansion est intervenu pendant les 20 premières semaines (figures 3 et 4). Pour les bétons contenant 4,0 kg/m³ d'alcalins actifs, la relation de linéarité ne semble plus s'appliquer. En effet, l'expansion des bétons ayant jusqu'à 30 % de cendres volantes progresse encore notablement au-delà de 20 semaines alors qu'avec 45 % de cendres volantes la progression est moins marquée. Si l'effet bénéfique des cendres volantes sur la réduction de l'expansion des bétons peut être généralisé, la relation linéaire observée pour ce mélange particulier nécessite d'être vérifiée pour toute autre combinaison granulaire.

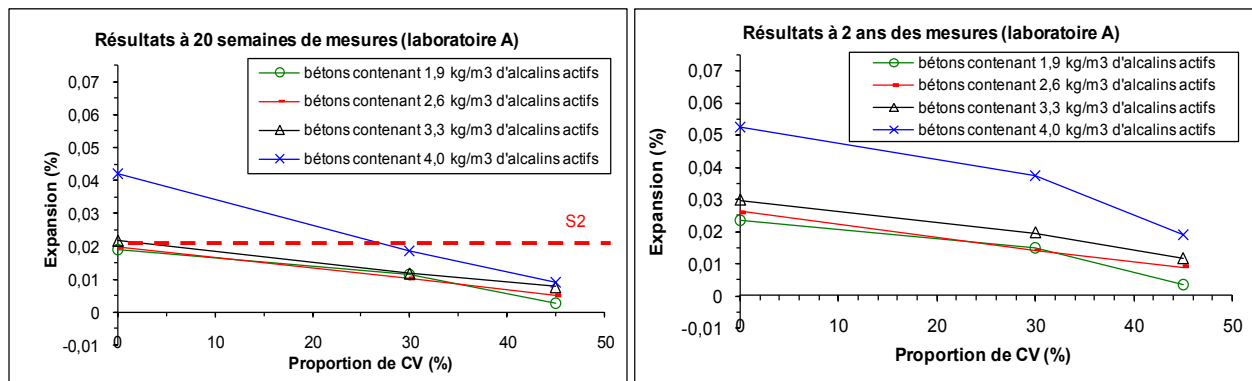


Figure 4. Expansions des bétons en fonction de la quantité de cendres volantes incorporées (à gauche : à 20 semaines, à droite : à 2 ans) pour le laboratoire A.

La figure 5 présente l'expansion des différents bétons testés, en fonction de la quantité d'alcalins actifs à l'échéance de 1 an. Les courbes des bétons composés de CEM I seul ou avec 30 % de cendres volantes confirment une accentuation de l'expansion pour les teneurs en alcalins supérieures à 3,3 kg/m³. Cependant ce phénomène n'apparaît pas pour les bétons constitués de 45 % de cendres volantes puisque, dans ce cas, la progression du gonflement reste faible même avec 4,0 kg/m³ d'alcalins actifs. Le béton à 4,0 kg/m³ d'alcalins actifs et composé de 30 % de cendres volantes présente une expansion qui se situe juste à la limite spécifiée dans le fascicule de documentation FD P18-456 à l'échéance de 1 an. Ce critère S3 (destiné aux liants autres qu'un CEM I seul) vient en complément du seuil S2 (seuil à 20 semaines) lorsque les pentes de l'expansion entre 12 et 20 semaines ne sont pas stabilisées. En revanche, l'expansion des bétons contenant 45 % de cendres volantes reste largement en dessous de ce seuil, même pour la plus forte teneur en alcalins.

Les expansions mesurées par le laboratoire B sont généralement légèrement inférieures à celles obtenues par le laboratoire A. Malgré cet écart de reproductibilité d'essais, les résultats du laboratoire B confortent les conclusions relevées avec le laboratoire A et confirment ainsi l'effet bénéfique des cendres volantes vis-à-vis de la réaction alcali-silice. A titre comparatif, les ordres de grandeur des gonflements mesurés sur les formules témoins à base de CEM III/A (62 % de laitier), réputés résistants à la réaction alcali-silice, sont comparables à ceux des bétons contenant 30 % de cendres volantes. Il peut également être noté que les bétons avec 45 % de cendres volantes conservent la plus faible expansion de tous les bétons testés dans cette étude.

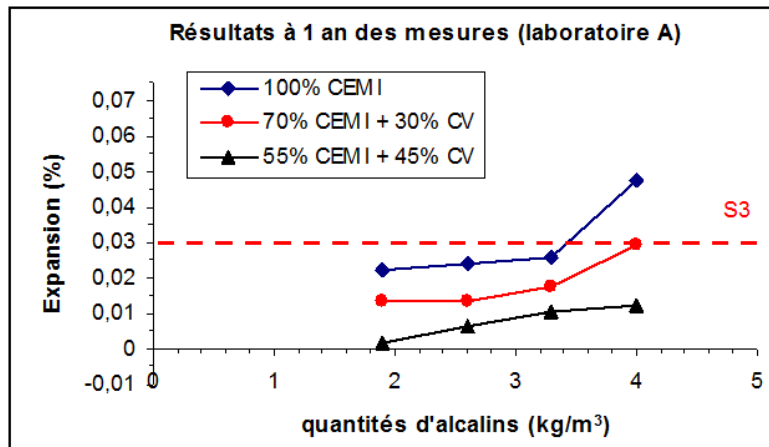


Figure 5. Expansions en fonction de la teneur en alcalins actifs du béton à 1 an mesurées par le laboratoire A.

6.3 Examen de prismes à l'acétate d'uranyle à 2 ans

A la fin des essais (2 ans), plusieurs prismes de béton ont fait l'objet d'une étude de caractérisation des produits d'altération issus de l'alcali-réaction (figures 6 et 7). La répartition générale du gel au sein du béton a été estimée par le test à l'acétate d'uranyl sur section longitudinale (mode opératoire LPC N°36). Cet essai consiste à pulvériser une solution d'acétate d'uranyl sur une fracture fraîche de béton obtenue par fendage suivant la direction axiale. Les ions uranyl fixés par les gels d'alcali-réaction ont la propriété, sous éclairage ultra-violet, de présenter une fluorescence de couleur jaune – verte très caractéristique. L'essai réalisé sur le béton de CEM I contenant 4,0 kg/m³ d'alcalins actifs révèle des sites fluorescents relativement abondants (figure 6). La conclusion est similaire pour le béton comportant 30 % de cendres volantes et 4,0 kg/m³ d'alcalins actifs, avec des quantités de gel relativement importantes. La dernière éprouvette analysée correspond au béton comportant 45 % de cendres volantes et 4,0 kg/m³ d'alcalins actifs (figure 7). Celle-ci se distingue des deux précédentes par une très faible fixation d'ions acétate qui traduit une faible quantité de gel présent. La fluorescence diffuse observée au sein de la pâte cimentaire est essentiellement localisée au centre des éprouvettes, la périphérie de chaque demi-prisme étant dépourvue de fluorescence. Ces différentes observations sont cohérentes avec les expansions mesurées sur ces mêmes éprouvettes de béton.

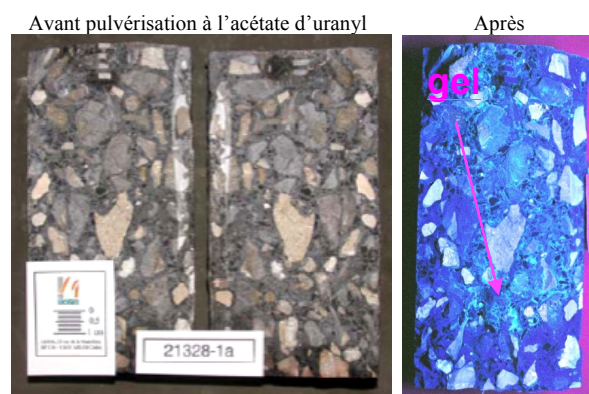


Figure 6. Essai à l'acétate d'uranyl sur des bétons contenant $4,0 \text{ kg/m}^3$ d'alcalins actifs avec ajout de 0% de cendres volantes

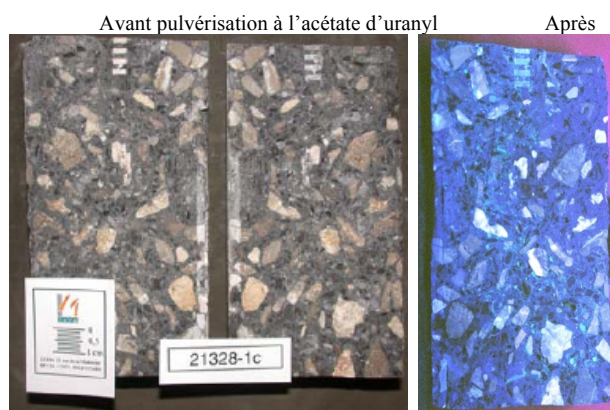


Figure 7. Essai à l'acétate d'uranyl sur des bétons contenant $4,0 \text{ kg/m}^3$ d'alcalins actifs avec ajout de 45% de cendres volantes.

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude visait essentiellement à évaluer l'intérêt d'augmenter la proportion de cendres volantes dans des bétons pouvant développer un risque d'expansion important dû à la réaction alcali-silice avec des granulats réactifs. Les formulations ont été établies en se basant sur le concept de liant équivalent autorisé jusqu'à 30 % de cendres volantes d'après la norme NF-EN 206/CN et extrapolé à 45 % pour cette étude. Les proportions de cendres volantes utilisées dans cette étude correspondent à celles entrant dans la composition des ciments de type CEM II/B-V ou CEM IV/A (formules étudiées avec 30 % de cendres volantes) et CEM IV/B (formules avec 45 % de cendres volantes). Plusieurs formules de bétons contenant respectivement 0 %, 30 % et 45 % de cendres volantes ont donc été testées avec des quantités d'alcalins actifs comprises entre $1,9 \text{ kg/m}^3$ et $4,0 \text{ kg/m}^3$. Deux laboratoires ont mené en parallèle les mêmes essais. Toutes les expansions ont été mesurées sur des éprouvettes de béton soumises à l'essai de performance NF P18-454 prolongé pendant deux ans et elles ont été comparées aux limites préconisées dans le fascicule de documentation FD P18-456 et le CCTG EDF de 2004.

L'étude démontre que :

- L'expansion des bétons contenant du ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF seul dépasse comme attendu les seuils lorsque les quantités d'alcalins actifs des formules sont supérieures à $3,3 \text{ kg/m}^3$.
- Avec 30 % de cendres volantes, l'expansion mesurée jusqu'à l'échéance de 2 ans est très modérée pour des teneurs en alcalins actifs allant jusqu'à $3,3 \text{ kg/m}^3$. Même à $4,0 \text{ kg/m}^3$ d'alcalins actifs,

l'expansion est significativement réduite avec 30 % de cendres volantes par rapport à celle du béton de CEM I seul. A quantité d'alcalins actifs égale, les bétons comportant 30 % de cendres volantes présentent de faibles expansions, similaires à celles obtenues avec les bétons confectionnés avec un ciment CEM III/A 42,5 N CE PM-ES-CP2 NF contenant plus de 60 % de laitier, proportion habituellement reconnue pour limiter les risques liés à l'alcali-réaction.

- Lorsque les bétons contiennent 45 % de cendres volantes, les expansions mesurées sont encore plus réduites et restent toujours nettement sous les seuils admissibles, même pour la teneur en alcalins actifs la plus élevée ($4,0 \text{ kg/m}^3$). Une augmentation de la quantité d'alcalins actifs de $3,3 \text{ kg/m}^3$ à $4,0 \text{ kg/m}^3$ n'entraîne donc pratiquement pas d'expansion supplémentaire pour les bétons avec 45 % de cendres volantes.
- Ainsi l'expansion résiduelle modérée pour les bétons comportant 30 % de cendres volantes, devient très faible avec 45 % de cendres volantes. Une relation de proportionnalité a été mise en évidence entre la limitation de l'expansion et la quantité de cendres volantes ajoutée. Pour une teneur en alcalins donnée, la quantité de cendres volantes introduite peut être ajustée en fonction de la réactivité du mélange granulaire.
- L'augmentation de la teneur en cendres volantes à 45 % dans les bétons n'inhibe pas totalement la réaction alcali-silice mais elle réduit très nettement les risques de gonflements néfastes. En effet, les très faibles expansions mesurées sur les bétons avec des cendres volantes sont bien inférieures aux limites préconisées dans le fascicule de documentation FD P18-456 pour qualifier une formule de béton vis-à-vis du risque d'expansion lié à la réaction alcali-silice.

Ainsi, cette étude confirme l'effet bénéfique des cendres volantes vis-à-vis de l'alcali-réaction et montre l'intérêt d'en augmenter la proportion au delà de 30 % dans le liant pour limiter les risques d'expansion du béton. Cette étude a permis en particulier d'alimenter la réflexion quant à la révision de la doctrine EDF concernant la prévention des ouvrages les plus sensibles vis-à-vis de l'alcali-réaction (niveau de prévention C). La version du CCTG EDF de 2016 affiche des prescriptions paramétrées en fonction de la composition du liant et de la teneur en alcalins actifs du béton. Les critères d'expansion de l'essai performance béton ont également été modifiés pour tenir compte du type de ciment et restent plus stricts que ceux du fascicule FD P 18-456. Ces essais peuvent en revanche ne pas être requis sous certaines conditions (teneur en cendres volantes supérieure à 40% et teneur en alcalins actifs inférieure à $2,5 \text{ kg/m}^3$ par exemple). Cette étude ouvre en outre de nouvelles perspectives pour le développement des cendres volantes avec certains granulats réactifs :

- soit en addition dans les bétons,
- soit dans les ciments CEM II/B-V, CEM IV ou CEM V, voire des futurs CEM II/C et CEM VI.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement tous les participants à cette étude pour leur contribution, notamment Mesdames A. Vichot et F. Hanoteau, Messieurs B. Bollotte, E. Brouard, B. Cariou, C. Charron, R. Lavaud, T. Mercenier, B. Michel, F. Thierry, J. Vecoven, ainsi que les personnels des laboratoires EDF-CEMETE et de l'industrie cimentière associés aux essais.

RÉFÉRENCES

- Malvar L.J. et Lenke L.R. (2006), Efficiency of fly ash in mitigating alkali-silica reaction Based on chemical composition, *ACI Material Journal*, 103: 319-326.
- Gholizadeh A., Wright J. et Rajadipour F. (2015), An extended chemical index model to predict the fly ash dosage necessary for mitigating alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, 82: 1-10.
- Play A., Olivier J. et Jeanpierre A. (2003), Long-term effectiveness of fly ash to reduce alkali-silica reaction in concrete – Influence of fly ash alkali content and aggregates reaction kinetics, *15th ACAA International Symposium on Management & Use of Coal Combustion Products (CCPs)*, St. Petersburg, Florida USA, 1: 41-73.
- Alasali M.M. et Malhotra V.M. (1991), Role of concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction, *ACI Materials Journal*, 88: 159-163

- Lindgard J, Fournier B., Ronning T. et Thomas M. (2016), Alkali–aggregate reaction: performance testing, exposure sites and regulations, *Construction Materials*, 169: 189-196.
- NF EN 450-1 (2012), *Cendres volantes pour béton – Partie 1 – Définition, spécifications et critères de conformité*, AFNOR.
- NF P18-454 (2004), *Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Essai de performance*, AFNOR.
- FD P18-456 (2004), *Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance*, AFNOR.
- Monnin Y. (2005), *Méthodologie pour décrire le gonflement multi-échelle de calcaires siliceux soumis à la réaction alcali-silice dans le matériau béton*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université d'Artois, 177 pages.
- FD P 18-464 (2014), *Béton - Dispositions pour prévenir les phénomènes d'alcali-réaction*, AFNOR.
- NF EN 206/CN (2014), *Béton – Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206*, AFNOR.
- EDF (2004), *Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) applicables aux travaux de gros œuvre*.
- EDF (2016), *Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) applicables aux travaux de gros œuvre*.
- Projet de méthode LPC N° 36 (1993), *Essai de mise en évidence du gel d'alcali-réaction par fluorescence des ions uranyl*, LCPC.