

Remplace SIA 2042:2012

Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten
Prevenzione dei danni causati dalla reazione alcali-aggregato (RAA) nelle opere di calcestruzzo

Prévention des désordres dus à la réaction alcali-granulats (RAG) dans les ouvrages en béton

SNV / licensed to 61764657 - EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne / S105964 / 2025-09-30_05:32 / SNR 592042:2022

2042

Numéro de référence
SNR 592042:2022 fr

Valable dès le: 2022-05-01

Éditeur
Société suisse des ingénieurs
et des architectes
Case postale, CH-8027 Zurich

Même si dans la présente publication les personnes et les fonctions sont indiquées au masculin, elles concernent également le féminin.

Les rectificatifs éventuels concernant la présente publication sont disponibles sous www.sia.ch/rectificatif.

La SIA décline toute responsabilité en cas de dommages qui pourraient survenir du fait de l'application de la présente publication.

2022-05 1^{er} tirage

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Avant-propos	4
0 Champ d'application	5
0.1 Délimitation	5
0.2 Références normatives	5
0.3 Dérogations	6
1 Terminologie	7
1.1 Termes et définitions	7
1.2 Symboles, termes et unités	7
2 Principes	8
2.1 Généralités	8
2.2 Mesures de prévention	9
3 Mesures de prévention de la RAG	11
3.1 Généralités	11
3.2 Exigences relatives au granulat	11
3.3 Exigences relatives au béton	13
3.4 Mesures supplémentaires requises pour la classe de prévention PK3	16
Annexe	
A (informative) Détermination des classes de risque RK1, RK2, RK3	17
B (informative) Détermination des classes d'environnement UK1, UK2, UK3	20
C (normative) Définition des classes de prévention PK1, PK2, PK3 et des mesures supplémentaires de la classe de prévention PK3	22
D (normative) Essai Microbar	26
E (normative) Procédure de transposition des résultats d'essai existants de formulations de béton vers une nouvelle formulation de béton incorporant des granulats de plusieurs domaines d'extraction	34
F (informative) Publications	37
G (informative) Index des termes	38

AVANT-PROPOS

Il y a environ 20 ans la réaction alcali-granulats (RAG) a été reconnue en Suisse comme un mécanisme significatif de dégradation des ouvrages en béton. La RAG est une réaction chimique entre le granulat alcali-réactif et les ions alcalins dans la solution des pores du béton. Cette réaction chimique est accompagnée d'une augmentation volumique générant des fissures, qui peuvent conduire à la destruction du béton.

Depuis lors, des études ont été entreprises dans le cadre de plusieurs projets de recherche du groupe de travail recherche en matière de ponts AGB de l'OFROU et de cemsuisse (voir l'annexe F), afin de mieux comprendre la situation en Suisse au niveau des types d'ouvrages concernés et de leur distribution géographique, du risque de désordres et de leur développement, ainsi que des mesures de prévention. En 2012 la première version du présent cahier technique a été publiée sur la base de ces résultats.

Le cahier technique est appliqué conjointement avec les normes SN EN 206:2013+A2 *Béton – Spécification, performances, production et conformité* et SIA 262 *Construction en béton*, qui ne contiennent pas d'exigences concrètes relatives à la résistance RAG. Lors de la révision de la norme SIA 262/1 *Construction en béton – spécifications complémentaires*, l'essai de performance du béton (anciennement l'annexe F du cahier technique) a été intégré dans les essais suisses de durabilité (actuellement norme SIA 262/1:2019, annexe G: essai de résistance à la RAG). Simultanément, une vaste révision du cahier technique s'imposait, afin de pouvoir tenir compte des expériences pratiques et des besoins des planificateurs et des producteurs pour une application simplifiée.

De ce fait, les exigences relatives aux mesures de prévention du présent cahier technique sont dorénavant couplées aux sortes de béton du bâtiment et du génie civil selon la norme SN EN 206:2013+A2, à la durée d'utilisation et au degré de fiabilité selon la norme SIA 260 *Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*. Si nécessaire, il est toujours possible de définir des mesures de prévention spécifiques à l'ouvrage (voir les annexes A, B et C).

Les critères d'évaluation de la résistance à la RAG du béton ont été complétés.

Les exigences concernant la preuve de la résistance à la RAG des bétons avec granulats recyclés ont été intégrées dans le cahier technique. L'eau de recyclage peut désormais être utilisée sans restriction.

La transposition des résultats d'essai de résistance à la RAG à d'autres formulations de béton a été révisée et complétée en ce qui concerne l'emploi des granulats et des additions. Les principes de transposition sont illustrés par des exemples d'application.

L'expérience à long terme de la résistance à la RAG d'une formulation de béton (décrite dans l'annexe D de l'ancien cahier technique) n'a pas été maintenue, puisque, pour autant qu'on le sache, depuis la parution du cahier technique cette annexe n'a pas été appliquée et ne pourra plus l'être, suite à la création des ciments modernes.

Les règles suisses concernant la procédure de l'essai Microbar sont maintenant intégrées dans la description de l'essai, qui devient l'annexe D.

Dans le cas de la RAG les coûts de prévention sont toujours justifiés, puisqu'il n'existe pratiquement pas de possibilité de réduire significativement le risque de RAG des ouvrages existants. Les coûts y associés sont faibles en comparaison avec les coûts engendrés par le maintien et la remise en état des ouvrages concernés. Les exigences de la résistance à la RAG, telles qu'elles sont définies dans le cahier technique, représentent des exigences minimales. En cas de durées d'utilisation prévues très longues, il est recommandé d'augmenter encore plus la résistance à la RAG par des mesures au niveau des matériaux et de la construction.

Groupe de travail SIA 2042 de la commission SIA 262

0 CHAMP D'APPLICATION

0.1 Délimitation

- 0.1.1 Ce cahier technique définit les règles de prévention de la réaction alcali-granulats (RAG) des nouveaux ouvrages en béton et s'applique conjointement avec les normes SN EN 206:2013+A2 et SIA 262. Il est appliqué au béton selon la norme SN EN 206:2013+A2, au béton avec granulats recyclés selon le cahier technique SIA 2030 ainsi qu'au béton projeté selon la norme SN EN 14487-1. Il peut être appliqué par analogie à l'analyse structurale et à la maintenance des ouvrages existants.
- 0.1.2 La livraison du béton à résistance élevée à la RAG selon ce cahier technique exige la certification du producteur selon la norme SN EN 206:2013+A2.
- 0.1.3 Ce cahier technique s'adresse aux auteurs de projet, maîtres d'ouvrage et autorités publiques ainsi qu'aux entrepreneurs et producteurs de granulats et de béton.

0.2 Références normatives

Le texte du présent cahier technique fait référence aux publications suivantes, dont les dispositions s'appliquent intégralement ou en partie selon ce qu'indique le renvoi. Les références non datées se rapportent à la dernière édition de la publication (pour les normes SN EN y compris les amendements), les références datées se rapportent à l'édition correspondante.

0.2.1 Publications SIA

Norme SIA 260	Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses
Norme SIA 262	Construction en béton
Norme SIA 262/1:2019	Construction en béton – spécifications complémentaires
Norme SIA 267:2013	Géotechnique
Cahier technique SIA 2030	Béton avec granulats recyclés

0.2.2 Normes européennes

SN EN 196-1	Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: Détermination des résistances
SN EN 197-1	Ciment – Partie 1: Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants
SN EN 206:2013+A2:2021	Béton – Spécification, performances, production et conformité
SN EN 450-1	Cendres volantes pour béton – Partie 1: Définition, spécifications et critères de conformité
SN EN 932-1	Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage
SN EN 932-2	Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 2: Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire
SN EN 933-11	Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 11: Essai de classification des constituants des gravillons recyclés
SN EN 12620:2002+A1:2008	Granulats pour béton
SN EN 13263-1+A1	Fumée de silice pour béton – Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité
SN EN 14487-1	Béton projeté – Partie 1: Définitions, spécifications et conformité
SN EN 15167-1	Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis – Partie 1: Définitions, exigences et critères de conformité

0.2.3 **Publications d'autres associations professionnelles**

VSS 70115 Granulats minéraux; minéralogie et pétrographie qualitative et quantitative
VSS 70116 Fillers; minéralogie, pétrographie et minéraux argileux gonflants

0.3 **Dérogations**

0.3.1 Des dérogations au présent cahier technique sont admises pour autant qu'elles soient suffisamment fondées sur des données théoriques ou sur des essais, ou qu'elles soient justifiées par de nouveaux développements ou de nouvelles connaissances.

0.3.2 En présence de conditions d'utilisation non couvertes par le présent cahier technique, la procédure à suivre doit être convenue entre l'auteur du projet, le maître d'ouvrage ainsi que d'éventuelles instances d'approbation. La procédure choisie doit être décrite de manière appropriée dans la convention d'utilisation.

1 TERMINOLOGIE

1.1 Termes et définitions

Pour l'application du présent cahier technique on utilisera les termes définis ci-après. Ces termes sont répertoriés par ordre alphabétique en deux langues à l'annexe G.

1.1.1 Réaction alcali-granulats

La réaction alcali-granulats (RAG) est une réaction chimique entre le granulats alcali-réactif et les ions alcalins dans la solution des pores du béton. Cette réaction chimique entraîne la formation de produits de réaction plus ou moins expansifs dont l'augmentation volumique conduit à une fissuration et à la dégradation du béton. En allemand, le terme AKR est utilisé pour abrégé « Alkali-Kieselsäure-Reaktion ». Le terme ASR est employé pour « Alkali-Silika-Reaktion » et « Alkali-Silikat-Reaktion ». En général, on utilise en allemand le terme AAR pour « Alkali-Aggregat-Reaktion ». Le terme RAG représente le terme général en français. La réaction appelée « alcali-carbonates » est extrêmement controversée parmi les spécialistes et son existence n'a pas été entièrement prouvée jusqu'à présent. En Suisse, aucune réaction de ce type n'est connue. À ce jour l'existence en Suisse de granulats à effet pessimum n'a pas été reconnue non plus (voir le chiffre 3.2.3).

1.1.2 Professionnel spécialisé

Un professionnel spécialisé dans le domaine de la RAG est un pétrographe ou une personne ayant une formation équivalente (par ex. en géologie, minéralogie). En plus il possède des connaissances spécifiques de technologie du béton et une vaste expérience de la résistance à la RAG du béton, en particulier dans l'analyse des désordres sur ouvrages et des essais spécifiques (pétrographie, essai Microbar, essai de résistance à la RAG).

1.1.3 Classe de prévention (PK1, PK2, PK3)

Les classes de prévention PK1, PK2 et PK3 résultent de la combinaison des classes de risque et d'environnement. La nécessité et le type de mesures à prendre sont déduits des classes de prévention.

1.1.4 Classe de risque (RK1, RK2, RK3)

Les classes de risque RK1, RK2 et RK3 décrivent les différents niveaux de risques acceptables en tenant compte de l'étendue des dommages et de la probabilité d'occurrence pendant la durée d'utilisation prévue, respectivement la durée d'utilisation restante.

1.1.5 Classe d'environnement (UK1, UK2, UK3)

Les classes d'environnement UK1, UK2 et UK3 regroupent des classes d'exposition selon la norme SN EN 206:2013+A2. Les classes d'environnement montrent la dépendance du développement des dommages dus à la RAG vis-à-vis des conditions d'exposition.

Remarque: L'utilisation d'une seule classe d'exposition de la norme SN EN 206:2013+A2 n'est pas adéquate pour la description des sollicitations du béton dues à la RAG.

1.1.6 Addition

Constituant minéral finement divisé, utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. La norme SN EN 206:2013+A2 traite deux types d'additions minérales:

- Type I: les additions quasiment inertes (fillers, pigments),
- Type II: les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent (par ex. cendres volantes, fumée de silice, laitier granulé de haut fourneau moulu, etc.). Afin de faciliter la lecture, le terme « laitier granulé de haut fourneau moulu » est abrégé en « laitier ».

1.2 Symboles, termes et unités

Les symboles ne sont utilisés que dans l'annexe D. Afin de faciliter le travail des laboratoires d'essai, les notations sont définies dans cette annexe.

2 PRINCIPES

2.1 Généralités

- 2.1.1 La résistance à la RAG du béton est considérée comme une exigence supplémentaire par rapport aux propriétés du béton et doit être spécifiée ainsi. En règle générale on prescrira l'utilisation du béton de type «béton à propriétés spécifiées» selon la norme SIA 262:2013, chiffre 3.1.1.2. Un exemple, basé sur les dispositions de la norme SIA 262:2013, chiffre 3.1.1.2.3, est donné ci-après :

Béton selon SN EN 206:2013+A2

C 30/37	résistance
XC4(CH), XD3(CH), XF4(CH)	classe d'exposition
$D_{max} 32$	diamètre maximal du granulat
Cl 0,10	classe de teneur en chlorures
C3	consistance
Exigence supplémentaire	résistance à la RAG selon SIA 2042

- 2.1.2 Les exigences concernant la résistance à la RAG du béton sont définies au chiffre 2.2. Les mesures de prévention dépendent des classes d'environnement et de risque de l'ouvrage.
- 2.1.3 Les essais décrits dans ce cahier technique pour la vérification de la résistance à la RAG du béton ne sont valables que s'ils sont réalisés par des laboratoires accrédités pour ces essais.
- 2.1.4 Pour obtenir un béton à résistance élevée à la RAG, il est possible d'utiliser un type de ciment adéquat (par ex. un ciment avec une teneur accrue en cendres volantes, schistes calcinés, fumée de silice ou laitier) ou d'ajouter au béton des cendres volantes, de la fumée de silice ou du laitier.
- Remarque : Ces mesures changent la composition de la solution interstitielle du béton de manière à ce que le granulat soit moins attaqué. Les ciments et additions mentionnés ci-dessus réduisent la teneur en ions alcalins et/ou la valeur pH de la solution interstitielle du béton.
- 2.1.5 L'emploi de farines de roches volcaniques (par ex. Trass, Phonolithes calcinées comme par ex. l'Hydrolith F200) peut avoir des effets négatifs ou positifs sur la résistance RAG. Leur aptitude doit être contrôlée au moyen de l'essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G.
- 2.1.6 L'emploi de sels de lithium pour la fabrication d'un béton résistant à la RAG n'est actuellement pas admis, faute d'expérience suffisante, ainsi que pour des questions de sécurité au travail et d'écologie relatives à certains composés de lithium.
- 2.1.7 Le béton avec granulats recyclés selon le cahier technique SIA 2030 peut être employé pour des ouvrages en béton, lorsqu'il n'y a pas d'exigence de résistance à la RAG. Sinon il faut respecter les exigences selon le tableau 1 ainsi que les chiffres 3.2.7 et 3.2.8. En cas de doute, un professionnel spécialisé doit être consulté.
- 2.1.8 Les critères de conformité sont définis dans ce cahier technique pour les granulats non alcali-réactifs au chiffre 3.2 et pour le béton à résistance élevée à la RAG au chiffre 3.3. Les dispositions des normes SN EN 12620+A1 respectivement SN EN 206:2013+A2 sont en outre applicables pour le contrôle de production par le fabricant.
- 2.1.9 La preuve de la résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, se fait normalement dans le cadre des essais préliminaires du béton. Une répétition de l'essai dans le cadre du plan de contrôle d'un projet de construction est seulement nécessaire, si la durée de validité du résultat d'essai est expirée ou en cas d'un changement de la formulation du béton non couvert par les règles de transposition du tableau 2.
- Remarque: Dans le cadre du plan de contrôle ou en cas de doute, il est possible de contrôler la composition du béton mis en œuvre.
- 2.1.10 Les annexes A, B et C de ce cahier technique sont conçues de manière à ce qu'elles puissent être intégrées par l'auteur du projet en tant qu'annexes dans la base du projet.

2.2 Mesures de prévention

- 2.2.1 Les exigences concernant la résistance à la RAG du béton sont définies dans le tableau 1 au moyen des classes de prévention PK1, PK2 et PK 3. Elles doivent être prescrites pour chaque élément de construction séparément.
- 2.2.2 Pour la classe de prévention PK1, aucune mesure particulière allant au-delà des exigences des autres normes en vigueur n'est requise. La résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, n'est pas exigée.
- 2.2.3 Pour la classe de prévention PK2 les exigences relatives aux granulats (selon le chiffre 3.2) ou relatives au béton (selon le chiffre 3.3) sont à respecter par le producteur.
- 2.2.4 La classe de prévention PK3 requiert des mesures supplémentaires qui doivent être prises en compte par le maître de l'ouvrage et ses mandataires selon le chiffre 3.4, en plus des exigences relatives au granulat (selon le chiffre 3.2) ou relatives au béton (selon le chiffre 3.3).
- 2.2.5 La classe la plus sévère prévaut si deux classes de prévention s'appliquent simultanément à un élément de construction (par ex. faces inférieure/supérieure, avant/arrière, interne/externe).
- 2.2.6 Au cas où les mesures prescrites pour une classe de prévention donnée ne sont pas entièrement réalisées, une justification dans la convention d'utilisation est exigée.
- 2.2.7 En principe les classes d'exposition selon la norme SN EN 206:2013+A2 sont déterminées sans tenir compte des mesures possibles.

Remarque: Dans le cas de systèmes de revêtement assurément durables (par ex. asphalte coulé, bardage, mais non les systèmes de protection de surface), qui changent les conditions d'exposition de manière significative, il est possible d'en tenir compte lors de l'évaluation des risques et le cas échéant lors de la définition des exigences concernant la résistance à la RAG du béton.

- 2.2.8 Les exigences du tableau 1 couvrent la majorité des applications. Dans des cas exceptionnels, il peut s'avérer nécessaire de définir les exigences relatives aux mesures de prévention de manière spécifique à l'ouvrage sur la base des classes de risque et d'environnement. Les classes de risque peuvent être définies en fonction de l'ouvrage en entier ou de ses éléments de construction, selon l'annexe A. Les classes d'environnement selon l'annexe B doivent être spécifiées pour chaque élément de construction séparément.
- 2.2.9 En cas de béton pour pieux ou parois moulées selon SN EN 206:2013+A2:2021, tableau NA.9, les exigences du tableau 1 pour les bétons A à C s'appliquent aux bétons P1 et P3 et pour les bétons D à G aux bétons P2 et P4.

Tableau 1 Exigences de résistance élevée à la RAG du béton et mesures supplémentaires selon le chiffre 3.4 pour assurer la durée d'utilisation exigée

Sorte de béton selon SN EN 206:2013+A2	Sorte A Sorte B	Sorte C	Sorte D Sorte E	Sorte F Sorte G
Classes d'exposition selon SN EN 206:2013+A2	XC0 XC1 XC2 XC3	XC4, XF1	XC4, XD1, XF2 XC4, XD1, XF3 XC4, XD1, XF4	XC4, XD3, XF2 XC4, XD3, XF4
Conditions du béton décisives	Saturation en eau faible à modérée ou saturation élevée	Saturation en eau modérée et légère sollicitation cyclique	Saturation en eau modérée, faible apport d'alcalins externes, forte sollicitation cyclique	Saturation en eau élevée, apport important d'alcalins externes, forte sollicitation cyclique
Facteurs aggravants	Les conditions d'environnement sont aggravées par un apport d'alcalins externes (sels de déverglaçage, infiltrations d'eau minéralisée, eaux souterraines), une température constamment élevée, une forte sollicitation cyclique par la température, l'humidité et le gel ainsi que des attaques chimiques			

Suite à la page 10

Tableau 1 (suite)

Sorte de béton selon SN EN 206:2013+A2	Sorte A Sorte B	Sorte C	Sorte D Sorte E	Sorte F Sorte G
Éléments d'ouvrage, exemples	Béton à l'intérieur (faible humidité relative de l'air) Béton à l'intérieur des bâtiments avec une forte humidité d'air (salles d'eau) Béton de masse à l'intérieur	Béton à l'extérieur, protégé des intempéries	Béton à l'extérieur, exposé aux intempéries (brouillard salin, faible à forte sollicitation par le gel ou le gel avec sels de déverglaçage)	Béton à l'extérieur, exposé aux intempéries (brouillard et éclaboussures salines, forte sollicitation par le gel avec sels de déverglaçage). Éléments de construction dans des sols ou des eaux souterraines fortement chargées en ions alcalins (évtl. agressifs pour le béton)
Durée d'utilisation et exigence relative au degré de fiabilité des structures porteuses selon la norme SIA 260:2013, chiffres 2.3.2 et 2.3.5				
Ouvrages temporaires : durée d'utilisation jusqu'à 10 ans	Résistance RAG n'est pas exigée (PK1)			
Éléments de construction remplaçables : durée d'utilisation jusqu'à 25 ans	Résistance RAG n'est pas exigée (PK1)			
Génie civil : ouvrages d'importance normale, durée d'utilisation jusqu'à 50 ans	Les sortes de béton A, B et C ne sont pas prévues dans le génie civil ¹⁾		Résistance élevée à la RAG exigée (PK2)	Résistance élevée à la RAG exigée (PK2)
Génie civil : ouvrages d'importance majeure, durée d'utilisation jusqu'à 100 ans			Résistance élevée à la RAG exigée avec des mesures supplémentaires (PK3)	Résistance élevée à la RAG exigée avec des mesures supplémentaires (PK3)
Bâtiment : structure porteuse, ouvrages d'importance normale (par ex. habitations), durée d'utilisation jusqu'à 50 ans	Résistance à la RAG non exigée (PK1)	Résistance à la RAG non exigée (PK1)	Les sortes de béton D, E, F et G ne sont pas prévues dans le bâtiment ¹⁾	
Bâtiment : Structure porteuse et éléments de façade, avec un degré élevé de fiabilité requis, ou une durée d'utilisation jusqu'à 100 ans	Résistance à la RAG non exigée (PK1)	Résistance élevée à la RAG exigée (PK2)		

¹⁾ Spécification selon les annexes A, B et C
PK1, PK2, PK3 : Classes de prévention

3 MESURES DE PRÉVENTION DE LA RAG

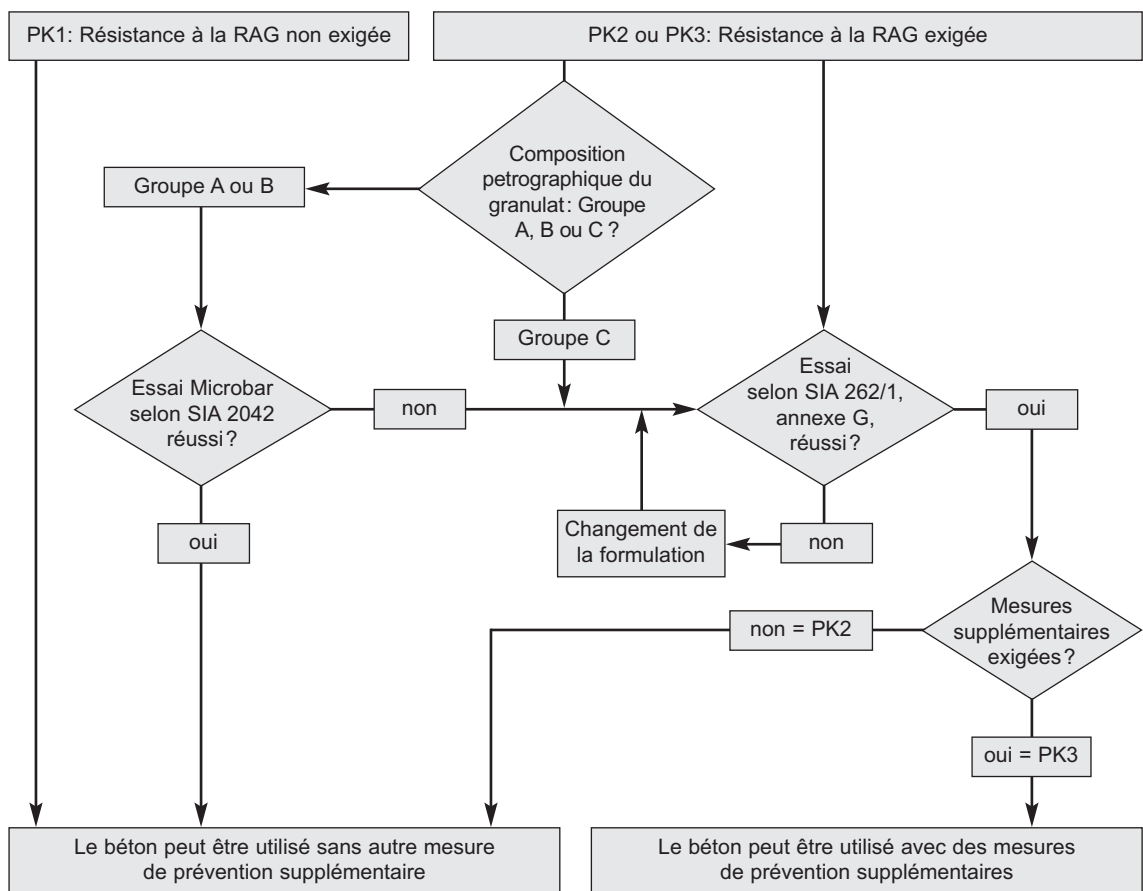
3.1 Généralités

3.1.1 La résistance à la RAG du béton peut être assurée par une seule mesure ou par la combinaison des mesures suivantes :

- Utilisation de granulats avérés non alcali-réactifs (granulat qui ne montre pas d'alcali-réactivité potentielle selon le chiffre 3.2 et l'annexe D),
- Utilisation d'un béton à résistance élevée à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, selon le chiffre 3.3,
- Mesures supplémentaires selon le chiffre 3.4 et le tableau 7 en annexe C.

3.1.2 La procédure de justification des mesures de prévention est illustrée à la figure 1.

Figure 1 Procédure de prévention de la RAG



3.1.3 L'essai Microbar n'est obligatoire que pour prouver la non alcali-réactivité du granulat. Si l'alcali-réactivité potentielle du granulat est connue ou peut être supposée, l'essai n'est pas nécessaire et il est recommandé de passer directement à l'essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G.

3.2 Exigences relatives au granulat

3.2.1 L'analyse pétrographique selon les normes VSS 70115 et VSS 70116 sert à l'identification du granulat et à l'évaluation de son aptitude à l'emploi pour la production de béton. En principe il est possible d'identifier par l'analyse pétrographique les granulats potentiellement alcali-réactifs et de vérifier l'applicabilité de l'essai Microbar aux différents granulats (voir l'annexe D). Une interprétation correcte des résultats de l'essai Microbar nécessite la connaissance de la nature pétrographique du granulat, par ex. à l'aide d'une analyse

selon les normes VSS 70115, resp. VSS 70116, permettant son attribution à un des trois groupes pétrographiques selon le chiffre D.5.

3.2.2 L'alcali-réactivité potentielle des granulats naturels pour les bétons à $D_{max} = 16$ mm ou 32 mm doit être contrôlée au moyen de l'essai Microbar selon la procédure d'essai en annexe D, soit pour les classes granulaires 0/4 mm et 8/16 mm, soit pour un mélange défini de toutes les classes granulaires. Pour les bétons avec un D_{max} différent, il faut adapter les classes granulaires ou mélanges granulaires à tester (voir le chiffre D.1).

3.2.3 Si l'allongement obtenu par l'essai Microbar est $< 0,110$ % pour tous les rapports ciment/granat des classes granulaires contrôlées, le granulat est considéré comme non alcali-réactif s'il remplit en outre les critères pétrographiques définis au chiffre D.5. Il peut être dès lors employé sans aucune autre mesure supplémentaire.

Si l'allongement est $\geq 0,110$ % pour au moins un des trois rapports ciment/granat des classes granulaires contrôlées, le groupe granulaire concerné du granulat est considéré comme potentiellement alcali-réactif (voir aussi le chiffre D.5). Dans ce cas, il faut apporter la preuve selon le chiffre 3.3 que la résistance à la RAG du béton fabriqué avec ce granulat est élevée.

Un granulat est qualifié de « potentiellement alcali-réactif avec effet de pessimum » si l'allongement du rapport ciment/granat = 5 est supérieur de plus de 10 % à celui correspondant au rapport ciment/granat = 2 et si la valeur limite est dépassée par au moins un des trois rapports ciments/granulats. Dans ce cas, il faut apporter la preuve selon le chiffre 3.3 que la résistance à la RAG du béton fabriqué avec ce granulat est élevée.

3.2.4 L'allongement obtenu par l'essai Microbar permet, conjointement avec les critères pétrographiques selon le chiffre D.5, de distinguer les granulats potentiellement alcali-réactifs des granulats non alcali-réactifs. Il ne fournit pas d'information sur le degré de l'alcali-réactivité du granulat.

3.2.5 Si les granulats employés proviennent de plusieurs domaines d'exploitation, les preuves par l'essai Microbar et les analyses pétrographiques doivent être fournies pour chaque domaine d'exploitation.

3.2.6 Les résultats des essais Microbar restent valables pendant 5 ans, s'il est garanti que pendant ce temps l'origine et la composition pétrographique du granulat n'ont pas changé significativement.

3.2.7 L'essai Microbar n'est pas admis pour l'évaluation des granulats recyclés (à l'exception des granulats naturels non liés et des pierres naturelles) et des granulats artificiels (par ex. verre, verre cellulaire, argile expansée).

3.2.8 Les granulats recyclés sont à considérer a priori comme des granulats potentiellement alcali-réactifs. Une exception est admise seulement si la provenance du granulat original, primaire est documentée de manière probante et si sa non alcali-réactivité a été démontrée selon le présent cahier technique.

3.2.9 Le résultat de l'essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, se limite en cas des granulats recyclés à un lot selon la norme SN EN 12620:2002+A1:2008, chiffre 3.11, entreposé séparément et dont l'homogénéisation est démontrée. L'homogénéité du lot doit être prouvée par un échantillonnage selon les normes SN EN 932-1 et SN EN 932-2 et une classification des composants selon la norme SN EN 933-11 ainsi qu'une analyse pétrographique suivant les principes de la norme VSS 70115. Le type et la fréquence d'échantillonnage doivent être définis par un professionnel spécialisé. L'évaluation des résultats doit être faite par un professionnel spécialisé.

3.2.10 La résistance à la RAG des bétons contenant des granulats légers vitreux doit être contrôlée selon le chiffre 3.3 à l'aide d'un essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G.

3.2.11 En principe des méthodes d'essai alternatives par rapport à l'essai Microbar ne sont pas admises. Dans le cadre de grands ouvrages, il est possible de convenir de l'utilisation d'autres essais normés pour l'assurance qualité, tels que par ex. l'essai de mortier selon la norme ASTM C1260 [1] ou l'essai autoclave selon la norme AFNOR P18-594 [2]. Comme dans le cas de l'essai Microbar, l'applicabilité de ces essais n'est pas assurée non plus et doit être évaluée par un professionnel spécialisé.

3.2.12 Le remplacement des granulats alcali-réactifs par des granulats non alcali-réactifs n'est pas justifié pour des raisons écologiques et économiques. Dans le cas où il n'est pas possible d'obtenir par des mesures de technologie du béton un béton à résistance élevée à la RAG selon le chiffre 3.3, cette solution peut être éventuellement envisagée pour la classe de prévention PK3. Un remplacement des classes granulaires individuelles peut s'avérer suffisant.

3.3 Exigences relatives au béton

3.3.1 Les bétons avec une résistance élevée à la RAG sont soit fabriqués avec des granulats non alcali-réactifs selon le chiffre 3.2.3, soit avec des granulats alcali-réactifs, en modifiant la formulation du béton de manière à ce que ce dernier remplisse les exigences selon le chiffre 3.3.3.

3.3.2 La résistance RAG d'un béton donné doit être contrôlée au moyen de l'essai selon la norme SIA 262/1: 2019, annexe G. Les critères d'évaluation sont définis au chiffre 3.3.3. Des méthodes d'essai alternatives ne sont pas admises.

Remarque 1: L'essai de résistance à la RAG peut être appliqué aux bétons selon la norme SN EN 206:2013+A2.

Remarque 2: Pour les bétons projetés par voie humide, on contrôlera le mélange de base selon la norme SN EN 14487-1 y compris l'accélérateur. Pour les bétons projetés par voie sèche, la composition à tester doit être déterminée par un professionnel spécialisé.

3.3.3 Les bétons possèdent une résistance élevée à la RAG s'ils remplissent un des trois critères suivants (voir aussi la figure 2):

Critère 1:

À l'échéance de 20 semaines de durée d'essai, la déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes est $\leq 0,200 \text{ ‰}$ (0,200 mm/m) et aucune valeur individuelle n'est $> 0,250 \text{ ‰}$ (0,250 mm/m).

L'évolution de la déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes entre les quatre dernières échéances de mesure (entre 8 à 12, entre 12 à 16 et entre 16 à 20 semaines), doit satisfaire aux conditions suivantes:

- deux des trois valeurs sont $\leq 0,025 \text{ ‰}$ (0,025 mm/m)
- la somme des trois valeurs est $\leq 0,100 \text{ ‰}$ (0,100 mm/m).

Critère 2:

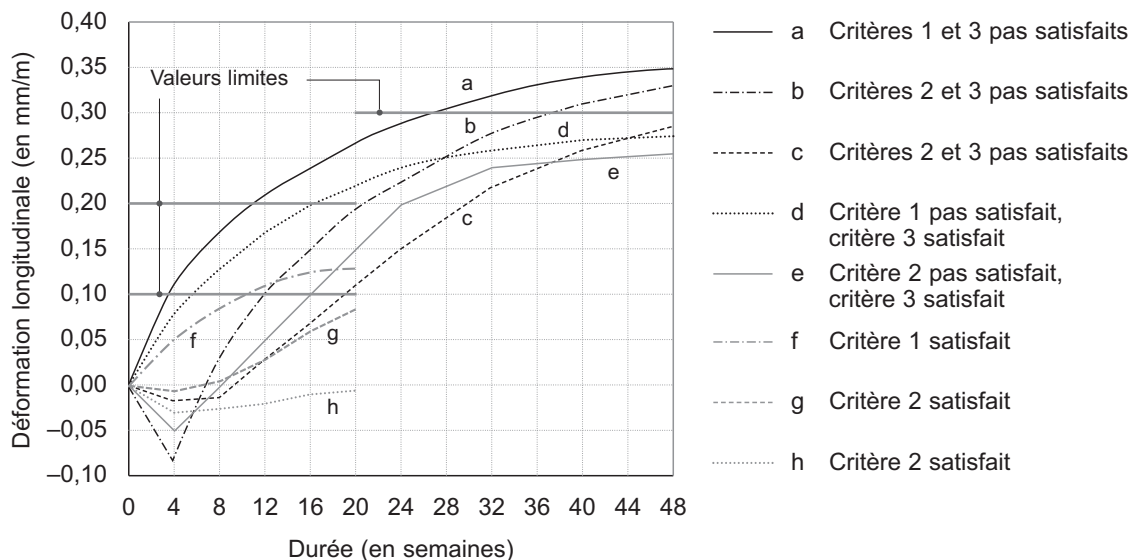
En cas de déformation longitudinale différée pendant les premiers mois: à l'échéance de 20 semaines de durée d'essai la déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes est $\leq 0,100 \text{ ‰}$ (0,100 mm/m) et aucune valeur individuelle n'est $> 0,150 \text{ ‰}$ (0,150 mm/m), indépendamment de l'évolution de la déformation longitudinale moyenne des éprouvettes entre les quatre dernières échéances.

Critère 3:

Une formulation de béton qui ne respecte pas les critères 1 ou 2 à l'échéance de 20 semaines peut néanmoins être apte à l'emploi:

- si la déformation longitudinale moyenne des trois éprouvettes est $\leq 0,300 \text{ ‰}$ (0,300 mm/m) à l'échéance de 48 semaines d'essai et aucune valeur individuelle n'est $> 0,350 \text{ ‰}$ (0,350 mm/m),
- et si pour une valeur de déformation longitudinale moyenne finale à 48 semaines entre 0,200 ‰ (0,200 mm/m) et 0,300 ‰ (0,300 mm/m), l'évolution moyenne de la déformation longitudinale des trois éprouvettes est $\leq 0,025 \text{ ‰}$ (0,025 mm/m) entre les trois dernières échéances de mesure (entre 32 à 40 et entre 40 à 48 semaines).

Figure 2 Exemples de courbes de déformation longitudinale possibles



- 3.3.4 Les critères d'évaluation au chiffre 3.3.3 sont également valables pour les bétons avec fibres, granulats de gomme ou autres constituants similaires, à condition qu'un professionnel spécialisé procède à l'analyse et à l'évaluation des résultats et des éprouvettes.
- 3.3.5 Si un béton ne satisfait pas aux critères selon le chiffre 3.3.3, sa formulation sera modifiée en conséquence. L'efficacité de la modification de la formulation du béton doit être prouvée par un nouvel essai.
- 3.3.6 Les résultats des essais de résistance à la RAG des bétons fabriqués avec un granulats naturel ou artificiel restent valables pendant 5 ans au maximum à partir de la date de confection des éprouvettes d'essai, s'il est garanti que pendant ce temps les exigences selon le chiffre 3.3.3 et du tableau 2 sont respectées. En cas de doutes fondés quant à la représentativité d'anciens résultats d'essai pour la production en cours, les essais sont à renouveler avant l'expiration des 5 ans.
- 3.3.7 Le tableau 2 définit les conditions limites de validité des résultats de l'essai de résistance à la RAG du béton qui sont à respecter pour pouvoir transposer ces résultats d'essai à un autre béton. Pour le béton de recyclage, il faut en plus respecter le chiffre 3.2.9.
- 3.3.8 La transposabilité des résultats d'essai en dehors des règles prescrites au tableau 2 doit être démontrée et évaluée par un professionnel spécialisé.
- 3.3.9 Les règles de transposition du tableau 2 sont à respecter en cas d'emploi de granulats de plusieurs domaines d'extraction. La procédure d'épreuve de la transposabilité est définie dans l'annexe E.
- Les règles de transposition du tableau 2 ne sont pas applicables en cas d'emploi de granulats alcali-réactifs à effet pessimum.
- Remarque : A ce jour, aucun granulats à effet pessimum n'a été reconnu parmi les roches du territoire suisse. En tout cas, un essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, de la formulation prévue, incluant ce granulats (dosage exact et courbe granulométrique), doit être réalisé.
- 3.3.10 Il est recommandé de procéder aux essais de résistance à la RAG de formulations de béton avec des dosages en ciment, additions et adjuvants couvrant les aléas relatifs aux exigences du chantier (par ex. ouvrabilité, résistance à court terme, etc.).

Tableau 2 Critères de transposition des résultats de l'essai de résistance à la RAG du béton selon SIA 262/1:2019, annexe G

Composant	Conditions limites, exigences
Granulats	<p>a) Les granulats proviennent du même domaine d'exploitation et présentent une composition pétrographique comparable. La vérification se basera par principe sur les normes VSS 70115 et VSS 70116 et, le cas échéant, sur l'essai Microbar.</p> <p>b) En cas de mélanges de granulats provenant de plusieurs domaines d'exploitation ou ayant des compositions pétrographiques différentes, les règles de l'annexe E s'appliquent. L'annexe E contient aussi un schéma de procédure et des exemples de cas pour la transposition des résultats d'essai de résistance à la RAG du béton incorporant des granulats de plusieurs domaines d'extraction.</p> <p>c) L'incidence d'un changement significatif de la teneur en granulats concassés (par ex. supérieur à 50 %) doit être évaluée par un professionnel spécialisé, sauf si la déformation longitudinale moyenne atteinte après 20 semaines de durée d'essai de résistance RAG du béton est $\leq 0,150$ ‰ ou après 48 semaines $\leq 0,250$ ‰.</p> <p>Remarque: Le fait que les granulats soient livrés par le même fournisseur n'est pas une preuve suffisante, car le granulats livré ne provient pas forcément de la même gravière ou peut avoir été acheté à un fournisseur tiers.</p>
Origine du ciment	Le ciment est produit par la même usine de ciment.
Type du ciment	Le béton contient le même type de ciment, avec une classe de résistance inférieure ou identique.
Teneur en ciment	Les résultats sont transposables à un béton dont la teneur en ciment est égale ou inférieure.
Rapport e/c	Le rapport e/c peut varier de $\pm 0,05$ au maximum.

Tableau 2 (suite)

Composant	Conditions limites, exigences
Additions	<p>Les additions sont de la même sorte (par. ex. cendres volantes) et proviennent du même fournisseur et du même producteur.</p> <p>A Formulations de béton initiales sans additions</p> <p>L'ajout d'une ou de plusieurs des additions suivantes (liste exhaustive), à savoir des cendres volantes selon SN EN 450-1, des fumées de silice selon SN EN 13263-1, du laitier selon SN EN 15167-1 et des additions type I non alcali-réactives, n'est permis qu'en cas de formulations de béton, dont la résistance élevée à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, a été prouvée avec un dosage en ciment identique ou supérieur.</p> <p>B Formulations de béton initiales avec additions de type I non alcali-réactives</p> <p>L'ajout d'une ou de plusieurs des additions suivantes (liste exhaustive), à savoir des cendres volantes selon SN EN 450-1, des fumées de silice selon SN EN 13263-1, du laitier selon SN EN 15167-1 et des additions de type I non alcali-réactives, n'est permis qu'en cas de formulations de béton, dont la résistance élevée à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, a été prouvée avec un dosage en ciment identique ou supérieur.</p> <p>C Formulations de béton initiales avec additions de type I et/ou type II</p> <p>C.1 Règles pour les additions de type I non alcali-réactives et type II non-alcali-réactives</p> <p>En cas de cendres volantes selon SN EN 450-1, de laitier selon SN EN 15167-1, de fumées de silice selon SN EN 13263-1 et d'additions de type I non alcali-réactives, une augmentation par rapport au dosage initial est permise, tout en respectant les prescriptions de la norme SN EN 206:2013+A2.</p> <p>Si la déformation longitudinale moyenne atteinte au cours de l'essai de résistance à la RAG après 20 semaines est $\leq 0,150 \text{ ‰}$ ou après 48 semaines $\leq 0,250 \text{ ‰}$, les réductions suivantes maximales par rapport au dosage pondéral initial sont admises :</p> <ul style="list-style-type: none"> – cendres volantes et laitier: 10 %, – additions de type I non alcali-réactives: sans limite (mais sans augmentation de la teneur en ciment), – fumée de silice: 3 %. <p>Un échange des additions n'est pas permis.</p> <p>C.2 Règles pour les additions de type I alcali-réactives</p> <p>En cas de farines de roches alcali-réactives selon le chiffre 3.2.3 une augmentation d'au maximum + 5 % par rapport au dosage pondéral initial est admise, si la déformation longitudinale moyenne atteinte au cours de l'essai de résistance à la RAG après 20 semaines est $\leq 0,150 \text{ ‰}$ ou après 48 semaines $\leq 0,250 \text{ ‰}$. Une réduction est permise.</p> <p>C.3 Règles pour les additions type II alcali-réactives</p> <p>En cas d'additions de type II alcali-réactives, comme par ex. l'Hydrolith F200, une augmentation par rapport au dosage initial n'est pas permise et nécessite un nouvel essai de résistance à la RAG du béton. Une réduction ou un échange avec des farines de roche non alcali-réactives selon le chiffre 3.2.3 (additions de type I), des cendres volantes selon SN EN 450-1, du laitier selon SN EN 15167-1 ou de fumées de silice selon SN EN 13263-1 sont permis, tout en respectant les prescriptions de la norme SN EN 206:2013+A2.</p>
Adjuvants	<p>Les changements du type et du dosage des adjuvants sont admis pour autant que la somme des teneurs en alcalins des adjuvants est inférieure à 5 % de la teneur en alcalins du béton définie selon la norme SIA 262/1:2019, annexe G, chiffre G.9, incl. l'ajout NaOH.</p>

3.4 Mesures supplémentaires requises pour la classe de prévention PK3

- 3.4.1 La classe de prévention PK3 requiert, en plus des exigences relatives au granulat ou au béton, l'examen et, le cas échéant, la réalisation des mesures supplémentaires possibles au niveau de l'ouvrage ou des éléments de construction afin de réduire le risque de RAG, par ex.:
- mesures au niveau de la conception du projet,
 - mesures au niveau du concept de la structure,
 - mesures de protection et d'étanchéité de l'ouvrage,
 - analyse de sensibilité,
 - mesures lors de la réalisation et de la surveillance.
- 3.4.2 Selon l'annexe C, les mesures supplémentaires sont à définir et à documenter par l'auteur du projet séparément pour tous les éléments porteurs importants.
- 3.4.3 De manière générale, et plus particulièrement dans le cas de grands ouvrages du génie civil, les mesures supplémentaires ainsi que les dérogations au présent cahier technique sont à définir dans la convention d'utilisation (voir aussi le chiffre 2.2.6).

Dans le domaine du bâtiment, ces indications peuvent être fixées dans la base du projet.

Remarque: La résistance élevée à la RAG doit être prescrite pour le béton à propriétés spécifiées en tant qu'exigence supplémentaire dans le projet de base (voir norme SIA 262:2013, chiffre 3.1.1.2).

Annexe A (informative)

Détermination des classes de risque RK1, RK2, RK3

- A.1 Les classes de risques RK1, RK2 et RK3 sont déterminées pour l'ouvrage en entier ou pour ses éléments séparément à l'aide du tableau 3 selon les critères suivants :
- A.2 Critères d'évaluation relatifs à l'ouvrage global :
- sécurité des personnes,
 - coût de l'ouvrage (pour la communauté),
 - importance de l'ouvrage (pour la vie et la desserte d'une région).
- A.3 Critères d'évaluation relatifs aux éléments (ou parties) d'ouvrage :
- sécurité des personnes,
 - importance du comportement structural de l'élément d'ouvrage,
 - entraves relatives à la surveillance de l'élément d'ouvrage,
 - entraves relatives à l'entretien et à la remise en état de l'élément d'ouvrage,
 - épaisseur de l'élément d'ouvrage.
- A.4 La classe de risque RK3 peut être directement attribuée à l'ouvrage ou à un élément d'ouvrage. Sinon les classes de risque sont déterminées sur la base de la somme N des notes attribuées en fonction des différents types de risques et de leurs critères.
- A.5 Si la classe de risque RK3 est attribuée à l'ouvrage globalement, les classes de prévention sont déterminées en fonction des classes d'environnement des différents éléments d'ouvrage selon l'annexe B.
- A.6 L'annexe A est conçue pour être intégrée directement en tant qu'annexe dans la base du projet. Les exemples qui y figurent servent d'aide à l'auteur du projet.
- A.7 L'annexe A est applicable aux ouvrages et aux éléments d'ouvrage d'une durée d'utilisation prévue d'au moins 50 ans selon la norme SN EN 206:2013+A2:2021, chiffre 5.3.2 (3). Si une durée d'utilisation inférieure ou supérieure est convenue (par ex. 20 ans ou 100 ans), l'attribution des notes peut être adaptée en conséquence.

Tableau 3 Détermination des classes de risque RK1, RK2, RK3 pour des ouvrages entiers

Ouvrage :		Élément de construction :		Base du projet, annexe no :	
Types de risques/critères		Attribution directe de la classe RK3	Attribution des notes en fct. des risques encourus en cas de dégâts dus à la RAG	Exemples d'ouvrages et d'éléments d'ouvrage	
Ouvrage entier	Sécurité des personnes	Effondrement global brutal et fragile de la structure	RK3	Barrages non armés, parking souterrain avec résistance insuffisante au poinçonnement, parois de pieux avec armature insuffisante de frettage	
		Effondrement global progressif et ductile de la structure		2 Parois de pieux munies d'un frettage approprié, murs de soutènement, dalles, poutres et sommiers du bâtiment	
	Coût de l'ouvrage (pour la communauté)	Coût exceptionnel	RK3	Barrages, centrales nucléaires, grands ouvrages d'art, tunnels, tranchées couvertes, ponts et viaducs, grands bâtiments, gares, hôpitaux, écoles, bâtiments publics	
		Coût élevé		3 Ponts et viaducs, grands murs de soutènement, ouvrages d'art, tunnels, tranchées couvertes, bâtiments, gares, hôpitaux, piscines, STEP, écoles, bâtiments publics	
		Coût moyen		2 Ponts, passages inférieurs et supérieurs, bâtiments moyens	
		Coût faible		1	
	Importance de l'ouvrage (pour la vie et la desserte d'une région)	Importance exceptionnelle	RK3	Barrages, centrales nucléaires, ponts constituant le seul accès à une région, grands ouvrages d'art, tunnels, tranchées couvertes, ponts et viaducs, grands bâtiments, gares, hôpitaux, écoles, bâtiments publics	
		Importance élevée		3 Ouvrages d'art, tunnels, tranchées couvertes, ponts et viaducs, grands murs de soutènement, bâtiments, gares, hôpitaux, piscines, STEP, écoles, bâtiments publics	
		Importance moyenne		2 Ponts, passages inférieurs et supérieurs, bâtiments moyens	
		Importance faible		1	
	Somme des notes N pour l'ouvrage en entier :				
	Attribution de la classe de risque ¹⁾ :				

¹⁾ Définition des classes de risques : $N \leq 3 = \text{RK1}$; $4 \leq N \leq 6 = \text{RK2}$; $N > 6 = \text{RK3}$

Tableau 4 Détermination des classes de risque RK1, RK2, RK3 pour des éléments d'ouvrage

Ouvrage :		Élément de construction :		Base du projet, annexe no :	
Types de risques/critères		Attribution directe de la classe RK3	Attribution des notes en fct. des risques encourus en cas de dégâts dus à la RAG	Exemples d'ouvrages et d'éléments d'ouvrage	
Élément d'ouvrage	Sécurité des personnes	Effondrement local brutal et fragile de l'élément	3	Pièces comprimées élancées avec armature de frettage insuffisante, éléments de façades suspendus, pièces fléchies avec armature de cisaillement insuffisante	
		Effondrement local progressif et ductile de l'élément	1	Pile de pont armé selon les règles de l'art, pilier du bâtiment armé correctement, dalles, poutres et sommiers du bâtiment	
	Importance du comportement structural de l'élément d'ouvrage	Importance vitale	RK3		Piles, fondations et culées des grands ponts, mâts et tablier des ponts haubanés, piles, fondations et culées des ponts implantés dans des versants de stabilité précaire, structures des tranchées couvertes, voûtes et radiers armés des tunnels, pieux
		Importance élevée		3	Tablier des grands ponts, parapets et bordures des ponts précontraints transversalement, fondations des grands bâtiments, autres structures enterrées du génie civil, parking souterrains
		Importance moyenne		2	Fondations des bâtiments moyens, autres structures enterrées du bâtiment
		Importance faible		1	
	Entraves relatives à la surveillance de l'élément	Surveillance impossible		3	Fondations superficielles des ponts et viaducs et du bâtiment, pieux préfabriqués
		Surveillance difficile ou onéreuse		2	Pieux forés, tranchées couvertes, revêtements des tunnels, autres structures enterrées du génie civil, parking souterrains
		Surveillance simple ou peu onéreuse		1	
	Entraves relatives à l'entretien et la remise en état de l'élément d'ouvrage	Entretien et remise en état impossibles		3	Fondations profondes des ponts et viaducs, pieux forés et préfabriqués, fondations profondes du bâtiment
		Entretien et remise en état difficiles ou onéreux		2	Fondations superficielles des ponts et viaducs et du bâtiment, parking souterrains
		Entretien et remise en état simples ou peu onéreux		1	
	Épaisseur de l'élément d'ouvrage	$E > 1,0 \text{ m}$		3	Fondations superficielles
		$0,1 \text{ m} \leq E \leq 1,0 \text{ m}$		2	
		$E < 0,1 \text{ m}$		1	
	Somme des notes N pour l'élément d'ouvrage :				
Attribution de la classe de risque ¹⁾ :					

¹⁾ Définition des classes de risques: $N \leq 6 = \text{RK1}$; $7 \leq N \leq 10 = \text{RK2}$; $N > 10 = \text{RK3}$

Remarque: Le mode de mise en œuvre du béton, choisi en fonction de la situation du chantier et/ou de l'élément d'ouvrage, peut éventuellement augmenter le risque à la RAG (pieux forés, éléments préfabriqués, béton projeté ou béton autocompactant, etc.).

Annexe B (informative)

Détermination des classes d'environnement UK1, UK2, UK3

- B.1 Les classes d'environnement regroupent des classes d'exposition selon la norme SN EN 206:2013+A2 en tenant compte des aspects suivants :
- saturation en eau du béton (faible, moyenne, en alternance, élevée)
 - sollicitation de l'élément de construction par des variations de température (faible, moyenne, élevée)
 - apport d'ions alcalins de l'extérieur sous forme de sels de déverglaçage ou d'eaux souterraines minéralisées (faible, moyen, élevé).
- B.2 La classe la plus sévère prévaut, si plusieurs classes d'environnement s'appliquent simultanément à un élément de construction (par ex. face inférieure/supérieure, avant/arrière, interne/externe).
- B.3 En principe la classe d'environnement est déterminée sans tenir compte des mesures de prévention possibles (voir aussi le chiffre 2.2.7).
- B.4 Cette annexe peut être intégrée en tant qu'annexe dans la base du projet. Les exemples qui y figurent servent d'aide à l'auteur du projet.

Tableau 5 Détermination des classes d'environnement UK1, UK2, UK3

Ouvrage :			Élément de construction :		Base du projet, annexe no :
Classe d'environnem.	Classe d'exposition ¹⁾	Sorte du béton ¹⁾	Description	Exposition de l'élément de construction	Exemples
UK1	XC1	A	Environnement sec, faible saturation en eau	À l'intérieur des bâtiments (faible humidité rel. de l'air)	Dalles, piliers, murs du bâtiment
	XC3 XF1 ou XC4 XF1	C	Humidité modérée et saturation modérée en eau sans agents de déverglaçage	À l'extérieur, protégé des intempéries et faiblement sollicité par le gel	Façades
UK2	XC1 ou XC2 ou XC3	A ou B	Humide en permanence ou humide, rarement sec ou humidité modérée. Forte saturation en eau possible, sans apport significatif d'alcalins externes (par ex. eau souterraine)	À l'intérieur des bâtiments avec une forte humidité rel. d'air, salles d'eau béton de masse à l'intérieur	Piscines couvertes, caves, sous-sols
	XC4 XD1 XF2 ou XC4 XD1 XF4	D (T1) ou E (T2)	Alternance d'humidité et de séchage, humidité modérée avec chlorures et saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage; sans imbibition et sans apport significatif d'alcalins externes (par ex. sels de déverglaçage)	À l'extérieur, exposé aux intempéries (brouillard salin, faible à forte sollicitation par le gel ou le gel avec sels)	Piles, banquettes sur pieux, radiers, dalles de transition, culées, murs de soutènement, dalles de roulement avec étanchéité

Tableau 5 (suite)

Ouvrage :			Élément de construction :		Base du projet, annexe no :
Classe d'environnem.	Classe d'exposition ¹⁾	Sorte du béton ¹⁾	Description	Exposition de l'élément de construction	Exemples
UK3	XC1 ou XC2	C, P1, P2, P3 ou P4	Humide en permanence ou humide, rarement sec, forte saturation en eau possible, sans apport significatif d'alcalins externes (par ex. eaux souterraines)	Éléments enterrés	Fondations du bâtiment et du génie civil, pieux
	XD3 XF2 ou XC4 XD3 XF4	G (T4) ou F (T3)	Alternance d'humidité et de séchage avec chlorures, forte saturation en eau avec agents de déverglaçage, apport significatif d'ions alcalins externes (par ex. sels de déverglaçage, eaux souterraines) ou températures élevées	A l'extérieur, exposé aux intempéries (éclaboussures salins, forte sollicitation par le gel); éléments dans des sols ou eaux souterraines fortement chargées en alcalins (évtl. agressifs)	Murs de soutènement, parapets et bordures, piles, revêtements routiers en béton, dalles de roulement non protégées par une étanchéité; parements et portails des tunnels et des tranchées couvertes
	XF3	D (T1)	Cycles de gel avec forte saturation en eau sans agents de déverglaçage	Piles dans l'eau, surfaces horizontales de béton: par ex. couronnements de mur, revêtements en béton non exposés aux sels de déverglaçage	
	XD2a	D (T1)	Humide, rarement sec, teneur en chlorures ≤ 0,5 g/l (eau douce), forte saturation en eau, apport significatif d'alcalins externes (eau)	Récipients, bassins de rétention pour des eaux fortement chargées en ions alcalins	
	XD2b	F (T3)	Humide, rarement sec, teneur en chlorures > 0,5 g/l (eau salée), forte saturation en eau, apport significatif d'alcalins externes (eau)		
Classe d'environnement :					

¹⁾ selon la norme SN EN 206:2013+A2.

Remarque: Les facteurs supplémentaires suivants peuvent amplifier la RAG: une classe d'exposition XA (attaques chimiques selon la norme SN EN 206:2013+A2), agents de dégivrage (acétates et formiates), une orientation sud des surfaces d'éléments de construction, de grandes variations journalières de température, fréquence exceptionnellement élevée de cycles de gel-dégel annuels, etc.

Annexe C (normative)

Définition des classes de prévention PK1, PK2, PK3 et des mesures supplémentaires de la classe de prévention PK3

- C.1 Les classes de prévention PK1, PK2 et PK3 sont définies soit directement selon le tableau 1 ou résultent de la combinaison des classes de risque et d'environnement selon le tableau 6. Les mesures de prévention à prescrire sont déduites de la classe de prévention.

Tableau 6 Définition des classes de prévention PK1, PK2 et PK3

Classe de risque	Classe d'environnement		
	UK1	UK2	UK3
RK1	PK1	PK1	PK1
RK2	PK1	PK2	PK2
RK3	PK2	PK2	PK3

- C.2 Pour la classe de prévention PK1 aucune mesure particulière, allant au-delà des exigences des autres normes en vigueur, n'est requise. La résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, n'est pas exigée.
- C.3 Pour la classe de prévention PK2 les exigences concernant soit le granulats (selon le chiffre 3.2), soit la résistance à la RAG du béton (selon le chiffre 3.3) sont à respecter par le producteur.
- C.4 La classe de prévention PK3 requiert des mesures supplémentaires qui doivent être prises en compte par le maître de l'ouvrage et ses mandataires selon le chiffre 3.4, en plus des exigences concernant soit le granulats (selon le chiffre 3.2), soit la résistance à la RAG du béton (selon le chiffre 3.3).
- C.5 La classe la plus sévère prévaut, si deux classes de prévention s'appliquent simultanément à un élément de construction (par ex. faces inférieure/supérieure, avant/arrière, interne/externe).
- C.6 Au cas où les mesures prescrites pour une classe de prévention donnée ne sont pas entièrement réalisées, une justification dans la convention d'utilisation est exigée.
- C.7 Les mesures supplémentaires pour la classe de prévention PK3 selon le chiffre 3.4 sont décrites au tableau 7 dans cette annexe. La liste des mesures indiquées n'est pas exhaustive. D'autres mesures non mentionnées, mais spécifiques à l'ouvrage peuvent s'avérer nécessaires.
- C.8 Les mesures supplémentaires et leur réalisation sont à documenter par l'auteur du projet séparément pour tous les éléments porteurs importants.
- C.9 Cette annexe peut être intégrée en tant qu'annexe dans la base du projet. Les exemples qui y figurent servent d'aide à l'auteur du projet.

Tableau 7 Mesures supplémentaires requises pour la classe de prévention PK3

Ouvrage :		Élément d'ouvrage :						Base du projet, annexe no :			
Type de mesures		Imposé en génie civil ou choix de l'auteur du projet : oui /non	Documentation						Commentaires/exemples		
			Convention d'utilisation	Base du projet	Rapport technique	Calcul statique	Plan de contrôle	Plan d'entretien et de surveillance			
Mesures relatives à la convention d'utilisation et à la base du projet	1	Fixer les exigences concernant la fissuration dans la convention d'utilisation	imposé en GC	x					x	L'élaboration d'une convention d'utilisation est exigée selon la norme SIA 260:2013, chiffre 2.2	
	2	Fixer les exigences d'étanchéité dans la convention d'utilisation	imposé en GC	x		x			x		
	3	Fixer les dérogations à SIA 2042 dans la convention d'utilisation	imposé en GC	x	x	x	x	x	x		
	4	Fixer les exigences en matière de robustesse et de ductilité dans la convention d'utilisation	imposé en GC	x	x						
	5	Fixer les exigences supplémentaires concernant le béton dues à la RAG dans la base du projet	imposé en GC		x			x	x		L'élaboration d'une base du projet est exigée selon la norme SIA 260:2013, chiffre 2.5.2
	6	Établir les bases des contrôles durant les travaux et de la surveillance durant l'utilisation dès le stade du projet de détail (projet définitif); définition des déformations admissibles pendant la réalisation et à l'état final	imposé en GC	x				x	x		Ces documents sont exigés selon la norme SIA 267:2013, chapitre 6, pour les structures en interaction avec le sol
Mesures de conception structurale	7	Pourvoir les structures non immergées d'une pente minimale pour éviter la stagnation des eaux	imposé en GC			x	x			Fondations superficielles, banquettes sur pieux, tranchées couvertes, dalles du bâtiment, dalles de roulement	
	8	Choix de structures dont la sécurité structurale et l'aptitude au service ne dépendent pas excessivement des résistances à la compression et à la traction du béton (mesures 14 et 15)					x			Toutes les mesures de conception et constructives favorisant la robustesse et la ductilité de la structure porteuse, afin d'éviter une défaillance fragile sans signes précurseurs, peuvent réduire le risque de diminution de la capacité portante des ouvrages due à la RAG	
	9	Recourir à des épaisseurs de béton suffisantes pour éviter une rupture fragile des sections					x			Poutres, murs, piliers et piles, dalles du bâtiment, dalles de roulement, radiers	
	10	Recourir à une armature de cisaillement pour éviter une rupture fragile prématurée, augmenter la robustesse et la ductilité des structures					x			Semelles filantes, radiers, murs et dalles de tranchées couvertes, fondations superficielles, radiers, murs et dalles des grands bâtiments	
	11	Recourir à une armature de fretage accrue pour éviter une rupture fragile prématurée, augmenter la robustesse et la ductilité des structures					x			Voûtes et radiers contrevoûtés des tunnels et tranchées couvertes de section rectangulaire, piliers du bâtiment, piles de ponts, pieux	

Tableau 7 (suite)

Ouvrage :		Élément d'ouvrage :						Base du projet, annexe no :			
Type de mesures		Imposé en génie civil ou choix de l'auteur du projet : oui /non	Documentation						Commentaires/exemples		
			Convention d'utilisation	Base du projet	Rapport technique	Calcul statique	Plan de contrôle	Plan d'entretien et de surveillance			
Mesures de conception structurale	12	Choix d'un concept de dilatation judicieux				x			Choix d'une structure aussi monolithique que possible pour éviter les circulations d'eau au droit des joints de dilatation; choix d'une fissuration contrôlée pour une étanchéification ultérieure plus simple	Tranchées couvertes, murs de soutènement, parois ancrées, radiers contrevoûtés en tunnel, dalles de roulement	
	13	Limitation de l'ouverture des fissures selon la norme SIA 262	imposé en GC				x		Dimensionnement de l'armature pour limiter l'ouverture des fissures sous déformations entravées et charges imposées	Grands bâtiments, ponts flottants, structures enterrées	
Mesures d'analyse de sensibilité	14	Évaluer les incidences d'une réduction sensible de la classe de résistance du béton sur la sécurité structurale de l'ouvrage (voir mesure 8)			x	x			Conclusions concernant les états critiques comme base pour la surveillance pendant l'exploitation	Piles de ponts, tranchées couvertes, voussoirs en tunnel, dalles du bâtiment, piliers du bâtiment, radiers	
	15	Évaluer les incidences d'une réduction sensible de la classe de résistance du béton sur l'aptitude au service de l'ouvrage (voir mesure 8)			x	x					
	16	Estimer l'incidence d'une expansion du béton sur la sécurité structurale et l'aptitude au service de l'ouvrage			x	x					Eclatements, entraves, impact sur les installations de service, conduites etc.; conclusions concernant les états critiques comme base pour la surveillance pendant l'exploitation
Mesures de protection de l'ouvrage	17	Système de protection hydrofuge renouvelable des surfaces exposées aux intempéries et aux sels de déverglaçage		x	x			x	x	Examen spécifique à l'ouvrage des mesures de protection adéquates	Parements et portails des tunnels et des tranchées couvertes, murs de soutènement, bordures et parapets
	18	Système de drainage durable des constructions souterraines et ouvrages enterrés		x	x			x	x		Tranchées couvertes, tunnels, murs de soutènement, bâtiments
	19	Système d'étanchéité durable des constructions souterraines et ouvrages enterrés		x	x			x	x		Dalles de roulement de ponts et viaducs, dalles de roulement de parking
	20	Système de protection renouvelable d'éléments de construction particuliers	imposé en GC	x	x				x		

Tableau 7 (suite)

Ouvrage :		Élément d'ouvrage :						Base du projet, annexe no :				
Type de mesures		Imposé en génie civil ou choix de l'auteur du projet : oui /non	Documentation						Commentaires/exemples			
			Convention d'utilisation	Base du projet	Rapport technique	Calcul statique	Plan de contrôle	Plan d'entretien et de surveillance				
Mesures lors de la soumission	21	Augmenter les exigences relatives au maintien de l'étaisage, du coffrage et de la cure						x	x	Dans les conditions particulières, dans le devis descriptif	Dalles du bâtiment, tranchées couvertes	
	22	Définir les exigences spécifiques à la RAG dans le programme de contrôle du maître d'ouvrage et dans le plan de contrôle de l'entrepreneur	imposé en GC						x	Documentation des produits de construction employés, incl. formulations de béton, provenance des granulats (domaine d'exploitation), résultats des contrôles d'assurance de qualité	Bâtiment, génie civil	
	23	Établir le plan de contrôle de l'ouvrage durant les travaux	imposé en GC						x	Structures en interaction avec le sol (voir mesure 6)		
	24	Établir le plan de contrôle et de suivi des déformations de l'ouvrage durant l'exploitation	imposé en GC							x	Structures en interaction avec le sol (voir mesure 6), documentation des déformations	
	25	Lister les mesures prévues pour garantir la pérennité des mesures de protection adoptées	imposé en GC	x				x	x		Type des mesures réalisées, intervalle de contrôle, prescriptions des méthodes de mesure, critères d'évaluation	

GC: Génie civil

Annexe D (normative)

Essai Microbar

D.1 Introduction

La méthode d'essai permet de qualifier l'alcali-réactivité d'un granulat au moyen des trois classes suivantes :

1. Les granulats non alcali-réactifs montrent des gonflements inférieurs à la valeur limite.
2. Les granulats potentiellement alcali-réactifs montrent des gonflements supérieurs à la valeur limite.
3. Les granulats potentiellement alcali-réactifs à effet pessimum contiennent certaines espèces minérales siliceuses facilement solubles en milieu alcalin. Dans ce cas, le risque d'expansion n'existe que lorsque ces espèces sont présentes dans une certaine plage de proportions.

L'alcali-réactivité dépend du squelette granulaire et de la composition de l'ensemble du granulat. De ce fait, il est nécessaire que les essais qualifient soit séparément les classes granulaires fines et grossières, soit exactement la granularité complète entrant dans la composition du béton.

D.2 Méthode d'essai

D.2.1 Principe

La réactivité potentielle des granulats vis-à-vis des ions alcalins du béton est mesurée par des essais de gonflement d'éprouvettes de mortier soumises à une cure dans la vapeur d'eau, puis à un autoclavage à 150 °C dans une solution de KOH.

D.2.2 Appareillage d'usage courant

- Tamis 0,16 mm et 0,63 mm, avec fond et couvercle,
- Broyeur permettant d'obtenir un sable 0,16 mm – 0,63 mm,
- Malaxeur à mortier selon la norme SN EN 196-1,
- Étuve ventilée, réglée à (150 ± 2) °C,
- Balance ayant une précision relative de 0,1%,
- Comparateur avec précision de lecture de 0,001 mm (de préférence digital), avec embout sphérique de diamètre 5 mm, monté sur un support de mesures muni à sa base d'un embout sphérique de diamètre 5 mm centré par rapport à la pointe du palpeur ou comparateur,
- Tournevis, pipette, marqueur noir indélébile résistant aux solutions alcalines à 150 °C ou crayon gris,
- Armoire humide > 95 % HR, réglée à (20 ± 2) °C, selon la norme SN EN 196-1,
- Règle d'arasage,
- Enceinte de conservation avec 100 % HR, à (20 ± 2) °C (par exemple dessiccateur avec un fond d'eau),
- Table à chocs, selon la norme SN EN 196-1.

D.2.3 Appareillage spécifique

- Autoclave : Récipients en acier inoxydable, de capacité de 70 ml à 150 ml, pouvant être bouchés hermétiquement et supporter une température de 150 °C.
- Adaptation du malaxeur du type décrit dans la norme SN EN 196-1 selon les figures 3 et 4 : bol permettant des gâchées de 150 g environ, palette à mouvement planétaire.
- Moules démontables en matériau autolubrifiant tel que PVC (à utiliser sans huile) et ne présentant pas de sensibilité aux agents alcalins, permettant la confection de quatre prismes de dimensions 10 mm x 10 mm x $(40 \pm 0,5)$ mm. Les logements prévus pour recevoir le mortier sont équipés d'inserts en acier inoxydable, vissés par l'extérieur et positionnés au centre des faces de section carrée. Ces inserts sont bloqués en position. Les plans des moules et des inserts sont donnés aux figures 5 et 6.
- Rehausse pour les moules.
- Couvercles de moules rectangulaires de 100 mm x 180 mm, d'épaisseur 8 mm, en matière plastique, maintenus à une distance de 5 mm de la surface des moules.
- Porte-éprouvettes en matériau résistant aux solutions alcalines à haute température (type polymère fluoro), permettant de maintenir les quatre éprouvettes en position verticale et sans contact entre elles à l'intérieur des récipients en acier inoxydable.
- Ballon à col large, muni d'un système permettant de positionner les quatre éprouvettes sans contact entre elles, ni avec les parois, verticalement au-dessus de l'eau en ébullition.

- Réfrigérant à boules avec un système permettant de recycler l'eau de condensation dans le ballon sans qu'elle ne coule sur les éprouvettes.
- Etalon de référence en invar, $L = (40 \pm 0,05)$ mm avec des extrémités adaptées à l'embout du palpeur et du support de mesures.

Figure 3 Mini-malaxeur

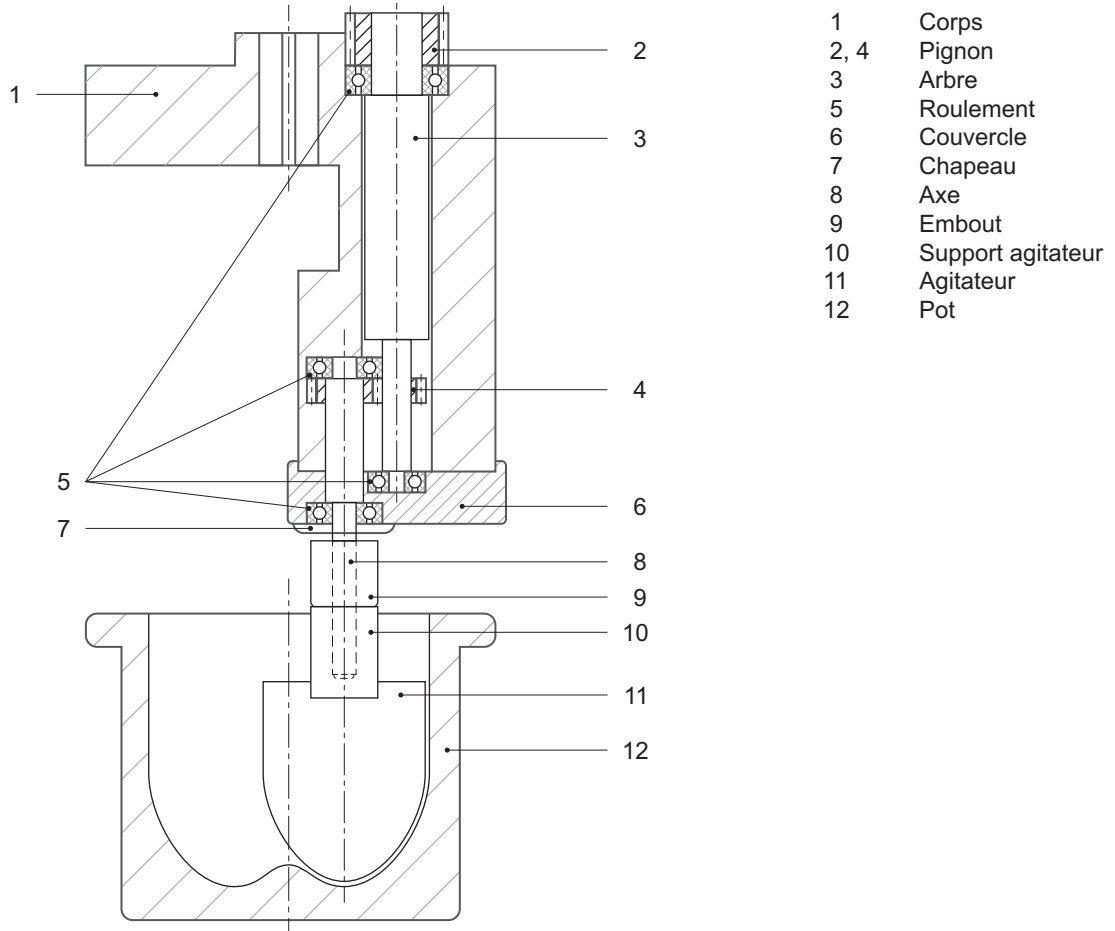


Figure 4 Pot agitateur du mini-malaxeur (dimensions en millimètres)

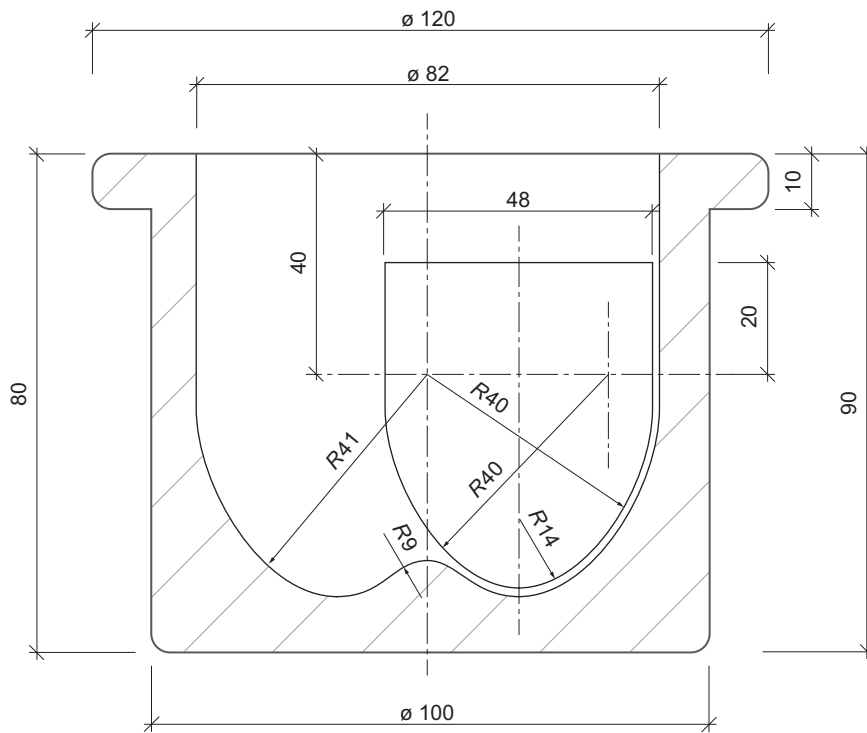


Figure 5 Moule pour éprouvettes 10 mm x 10 mm x 40 mm (dimensions en millimètres)

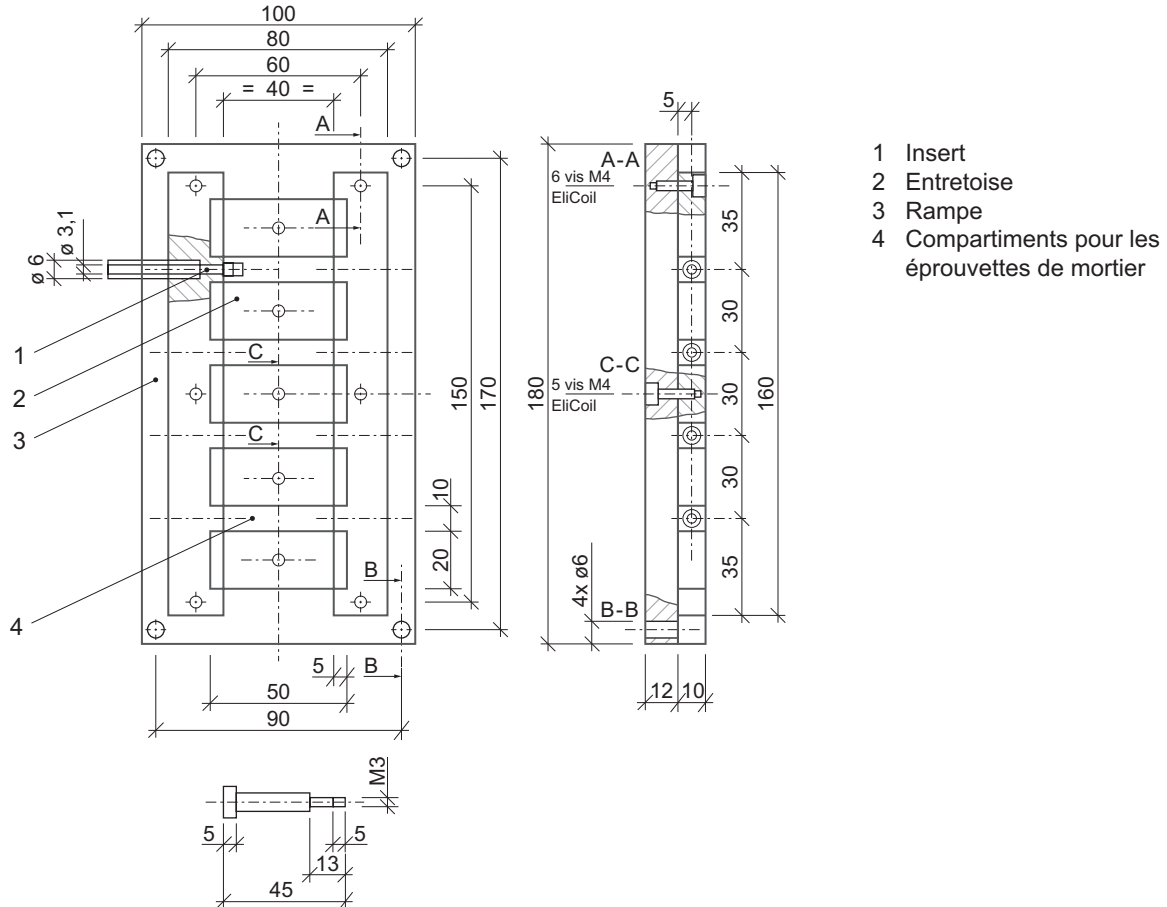
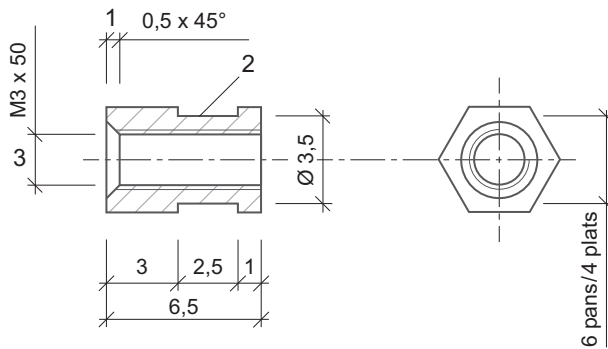


Figure 6 Insert 6 pans/4 plats en acier inoxydable (dimensions en millimètres)



- 1 Portée conique pour contact avec bille du comparateur
- 2 Saignée permettant le bon accrochage de la pâte de ciment
- 3 Filetage servant à la fixation de l'insert sur la paroi du moule

D.2.4 Réactifs et matériaux

- Solution KOH à 10 % (qualité pour analyses),
- Solution NaOH à 2 mol/kg, soit $(80 \pm 0,05)$ g NaOH par kg de solution,
- Soude en pastilles (qualité pour analyses),
- Eau déionisée,
- Ciment CEM I 42,5 selon SN EN 197-1 avec un teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ (% de masse $\text{Na}_2\text{O} + 0,658$ % de masse K_2O) entre 0,6 % et 1,0 % de masse et une teneur en MgO < 2 % de masse (analyses XRF). L'essai doit être réalisé par tous les laboratoires avec un ciment identique, afin d'assurer la comparabilité des résultats. Le ciment pour la confection des éprouvettes peut être obtenu auprès du département béton/chimie de la construction de l'Empa à Dübendorf (y compris l'indication de la teneur en ions alcalins solubles à l'acide).

D.2.5 Matériau soumis à l'essai

Le matériau peut être un granulat classé ou un échantillon de roche.

L'échantillon est préparé suivant les prescriptions de la norme SN EN 932-2. La masse minimale nécessaire pour effectuer l'essai est de 3 kg.

Obtention du sable 0,16 mm–0,63 mm :

Principe: Le matériau soumis à l'essai est un sable 0,16 mm–0,63 mm. Il est obtenu par tamisage et broyage jusqu'à refus nul à 0,63 mm de la totalité de l'échantillon pour l'essai.

Pour les sables, afin d'éviter un surbroyage des fines 0,16 mm–0,63 mm, celles-ci seront isolées préalablement par un tamisage puis associées au sable 0,16 mm–0,63 mm obtenu par broyage du refus à 0,63 mm. Pour minimiser la part de fines < 0,16 mm produite lors du broyage du refus à 0,63 mm, effectuer le broyage de manière modérée en évacuant régulièrement par tamisage à sec le passant à 0,63 mm.

Tamiser sous l'eau l'échantillon broyé, conserver la classe granulaire 0,16 mm–0,63 mm qui sera séchée à (80 ± 5) °C et ensuite homogénéisée.

Peser trois prises d'essai de granulat sec pour la confection des éprouvettes selon le tableau 8.

Tableau 8 Prises d'essai du granulat broyé

Prises d'essai	Masse du sable 0,16 mm–0,63 mm pour le mini-malaxeur
Prise 1	$(10 \pm 0,05)$ g
Prise 2	$(16 \pm 0,05)$ g
Prise 3	$(40 \pm 0,05)$ g

D.2.6 Confection du mortier avec le mini-malaxeur

La confection du mortier se fait avec le mini-malaxeur selon la figure 3. Trois mélanges sont préparés selon le tableau 9, de manière à obtenir des mortiers de rapports ciment/granulat (C/G) égaux à 2, 5 et 10.

Tableau 9 Quantités à peser pour le mini-malaxeur

Mélange	1	2	3
Rapport C/G	2	5	10
Ciment	(80 ± 0,1) g	(80 ± 0,1) g	(100 ± 0,1) g
Solution NaOH	(24 ± 0,05) g	(24 ± 0,05) g	(30 ± 0,05) g
Granulat	(40 ± 0,05) g	(16 ± 0,05) g	(10 ± 0,05) g

La quantité de solution de soude Q_{NaOH} (NaOH 2 mol/kg) est calculée de façon à obtenir une concentration en Na_2O_{eq} finale de 1,5 % dans le ciment par la formule suivante :

$$Q_{NaOH} = \frac{(1,5-x)}{62} \cdot 1000 \cdot \frac{m_c}{100} \quad \text{en g} \quad (1)$$

Q_{NaOH} quantité de solution NaOH 2 mol/kg, en grammes, à peser avec une précision de 0,05 g
 x concentration Na_2O_{eq} du ciment, en % de masse
 m_c masse de ciment pour la prise d'essai (80 g ou 100 g)

Compléter à 30 g ou 24 g selon le mélange (1, 2 ou 3) avec de l'eau déionisée.

Exemple de calcul de la quantité nécessaire de :

- solution NaOH (2 mol/kg), c'est-à-dire (80 ± 0,05) g NaOH dans 920 g eau déionisée
- Na_2O_{eq} du ciment : 0,91 % de masse

Il en résulte :

$$Q_{NaOH} = 7,61 \text{ g ou } 9,52 \text{ g selon le rapport C/G}$$

Ensuite :

- mélanges 1 + 2 : peser (7,61 ± 0,05) g solution NaOH et compléter à 24 g avec de l'eau déionisée
- mélange 3 : peser (9,52 ± 0,05) g solution NaOH et compléter à 30 g avec de l'eau déionisée.

D.3 Exécution de l'essai

D.3.1 Gâchage

Introduire le ciment et le granulat pour le mélange 1 dans le bol du malaxeur et mélanger à petite vitesse durant 1 minute. Les vitesses mentionnées sont identiques à celles de la norme SN EN 196-1. Ajouter la solution NaOH. Malaxer pendant 1 minute à petite vitesse, puis 2 minutes à grande vitesse. Racler à l'aide d'une spatule souple les parois et l'agitateur. Malaxer de nouveau pendant 2 minutes à grande vitesse.

D.3.2 Confection des éprouvettes

Introduire le mortier correspondant au mélange 1 dans les quatre compartiments du moule, en commençant par les extrémités et en insistant au niveau des inserts pour ne pas emprisonner de bulles d'air. Remplir les moules à mi-hauteur. Placer la rehausse et positionner l'ensemble au centre de la table à secousses, en fixant le moule avec deux serre-joints. Compacter 15 coups. Compléter le remplissage jusqu'à mi-hauteur de la rehausse. Compacter à nouveau 3 x 15 coups. Ôter la rehausse et araser avec la règle le mortier excédent avec un mouvement rapide cisailant allant du centre vers l'extérieur du moule.

Procéder de la même manière à la confection des prismes des mélanges 2 et 3. Conserver les moules recouverts de leurs couvercles en armoire humide pendant (24 ± 0,5) heures.

D.3.3 Démoulage et mesure initiale L_0

Démonter les moules, en commençant par dévisser les vis situées au-dessous des moules, puis les vis qui maintiennent les inserts en position. Démontez ensuite les parois latérales et décollez les éprouvettes des entretoises. Numéroté chaque éprouvette.

Vérifier que les inserts soient libres de toute poussière ou aspérité, si nécessaire les nettoyer. Mettre le comparateur ou palpeur à zéro, en utilisant l'étalon en invar, puis procéder aux mesures L_0 des 12 éprouvettes.

Effectuer un premier cycle de mesure en commençant par l'éprouvette 1 et terminer le cycle par la deuxième mesure de l'étalon en invar. Si cette dernière s'écarte de plus que $\pm 0,001$ mm de la première mesure, nettoyer les palpeurs et l'étalon et mettre le comparateur de nouveau à zéro.

Effectuer un second cycle de mesure.

Si la différence entre la seconde et la première mesure d'une éprouvette est $> 0,002$ mm à la fin du cycle de mesure, nettoyer à nouveau les inserts de l'éprouvette concernée ainsi que l'étalon et effectuer de nouveau la mesure de l'éprouvette, ceci jusqu'à stabilisation à $\pm 0,002$ mm entre deux mesures successives de l'éprouvette.

D.3.4 Cure à la vapeur

Le début de la cure s'effectue ($24 \pm 0,5$) heures après la confection des éprouvettes. Si les séries ont été confectionnées dans un intervalle de temps suffisamment court et si le démoulage et les mesures L_0 se déroulent rapidement, on peut placer les éprouvettes dans l'enceinte humide en attente de la deuxième et troisième série de la journée, afin de débiter la cure vapeur simultanément.

Placer les éprouvettes dans le ballon à col large au-dessus de l'eau en ébullition. Veiller à éviter les contacts mutuels, en séparant les éprouvettes de 2 mm, la vapeur d'eau doit pouvoir circuler librement autour des éprouvettes. Laisser (240 ± 15) minutes en système clos.

Placer les éprouvettes dans l'enceinte de conservation et les laisser refroidir à une température de (20 ± 2) °C et une humidité relative de l'air de 100% jusqu'à ce qu'elles atteignent 20 °C (entre 4 h et 24 h).

D.3.5 Cure alcaline

Disposer les quatre éprouvettes du même mélange dans les porte-éprouvettes, eux-mêmes placés dans les récipients en acier inoxydable. Recouvrir de solution KOH à 10 %. Fermer et conserver les récipients dans l'étuve à (150 ± 2) °C pendant (360 ± 10) minutes.

Laisser les récipients refroidir suffisamment, afin d'éviter des éclaboussures de KOH en raison de la surpression: sortir les récipients de l'étuve, les plonger dans un bain d'eau froide (par ex. dans un évier rempli d'eau froide), attendre 3 à 4 minutes, ouvrir les récipients (à l'aide d'une pince et des gants).

Sortir les éprouvettes, les rincer modérément à l'eau déionisée (les gicler avec de l'eau déionisée ou les plonger brièvement dans de l'eau déionisée), les égoutter et placer en enceinte de conservation pendant (60 ± 5) minutes. Avant la mesure (voir le chiffre D.3.6), tamponner les 6 faces avec une éponge humide préalablement mouillée et essorée.

D.3.6 Mesures de L_1 et L_c

Vérifier la propreté des inserts. Effectuer les mesures de longueur L_1 des éprouvettes (procédure identique au chiffre D.3.3). Garder les éprouvettes dans l'enceinte de conservation à (20 ± 2) °C et mesurer à nouveau le lendemain pour contrôle (L_c).

D.4 Expression des résultats

Calculer pour chaque éprouvette l'allongement relatif $\varepsilon(n)$.

$$\varepsilon(n) = \frac{L_1(n) - L_0(n)}{L_R + L_0(n)} \cdot 100 \quad (2)$$

L_1 mesure finale (après la cure alcaline)

L_0 mesure initiale

L_R longueur de référence

n numéro de l'éprouvette

Pour le calcul des allongements relatifs, on utilise les deuxièmes mesures L_1 (les premières mesures L_1 ne sont utilisées que lorsqu'une impureté induit de grandes différences entre les deux cycles de mesures L_1).

Les valeurs L_c servent au contrôle. Si la valeur moyenne des mesures de contrôle L_c s'écarte de plus de 15 % de la valeur moyenne des mesures L_1 d'un des trois mélanges, il faut répéter l'essai.

Pour chaque rapport C/G = 2, 5 et 10, le résultat exprimé en pourcentage est la moyenne des $\varepsilon(n)$ des quatre éprouvettes correspondantes. Lorsque l'allongement relatif moyen est supérieur à 0,03 %, l'allongement rela-

tif de chaque éprouvette ne doit pas s'écarter de $\pm 15\%$ de la valeur moyenne. Sinon cette valeur sera éliminée. Si l'une des trois valeurs restantes présente un écart supérieur à 15% de la moyenne des trois valeurs restantes, la série est annulée et il faut répéter l'essai.

Pour les trois rapports C/G = 2, 5 et 10, l'allongement le plus élevé est retenu pour évaluer l'alcali-réactivité du granulat testé.

D.5 Règles d'application et interprétation des résultats

Les granulats fins et grossiers sont évalués séparément en fonction de leur composition pétrographique et des résultats de l'essai Microbar. La valeur limite de l'essai Microbar est définie au chiffre 3.2.3.

L'aptitude de l'essai Microbar pour contrôler correctement l'alcali-réactivité dépend de la composition pétrographique du granulat. Celle-ci est déterminée selon la norme VSS 70115, si une classification dans un des groupes suivants est impossible par manque d'informations (comme par ex. provenance, situation géologique, analyses pétrographiques disponibles, etc.). En l'absence de données de la composition pétrographique des granulats, les valeurs de l'essai Microbar ne sont pas interprétables.

On distingue trois groupes de roches sur la base de la composition pétrographique du granulat :

Groupe A

L'alcali-réactivité des granulats composés essentiellement de calcaires purs, calcschistes, marbres, dolomies, etc. (c'est-à-dire des calcaires sans quartz et/ou silicifications) peut être contrôlée au moyen de l'essai Microbar.

- Si l'essai Microbar entraîne un allongement inférieur à la valeur limite, le granulat est considéré comme non réactif. Un essai supplémentaire n'est pas nécessaire.
- Si l'allongement est supérieur à la valeur limite, cela signifie que de la silice est présente et qu'elle n'a apparemment pas pu être mise en évidence par la simple analyse pétrographique. Le granulat est considéré comme alcali-réactif. Un essai de la résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, est nécessaire pour contrôler le comportement du granulat dans une formulation de béton donnée.

Groupe B

L'alcali-réactivité des granulats présentant un mélange de différents types de roches (par ex. des granulats des gravières du plateau suisse) peut être contrôlée au moyen de l'essai Microbar. Ces granulats peuvent contenir des teneurs variables de roches non alcali-réactives à fortement alcali-réactives. Lorsque la teneur en silice des granulats augmente (par ex. grès à ciment siliceux et calcaires siliceux), la valeur de l'essai Microbar a tendance à s'élever.

- Si l'essai Microbar entraîne un allongement inférieur à la valeur limite, le granulat est considéré comme non alcali-réactif. Un essai supplémentaire n'est pas nécessaire.
- Si l'allongement est supérieur à la valeur limite, le granulat est considéré comme alcali-réactif. Un essai de la résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, est nécessaire pour contrôler le comportement du granulat dans une formulation de béton donnée.

Groupe C

L'alcali-réactivité des granulats composés essentiellement de roches métamorphiques ou de roches cristallines (dont aussi des quartzites, arénites quartzitiques, sables quartzitiques) ne peut pas être contrôlée au moyen de l'essai Microbar. Certains granulats alpins, réagissant très lentement montrent une non-alcali-réactivité apparente dans l'essai Microbar.

Ces granulats sont donc toujours classés comme potentiellement alcali-réactifs. Un essai de la résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, est toujours nécessaire pour contrôler le comportement du granulat avec une formulation de béton donnée.

D.6 **Rapport d'essai**

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes :

- Référence au cahier technique SIA 2042,
- Mandant,
- Date de l'essai,
- Granulat :
 - provenance, date de l'échantillonnage
 - groupe granulaire testé, ou
 - en cas d'un mélange granulaire : les proportions exactes en % de masse
 - classification dans un des groupes pétrographiques selon le chiffre D.5,
- Allongement relatif moyen, indiqué avec une précision de 0,001 %, pour les trois rapports ciment/granulat, sous forme d'un tableau et d'un diagramme,
- Evaluation des résultats selon le chiffre 3.2.3.

D.7 **Exigence relative au laboratoire d'essai**

L'essai n'est valable que s'il est réalisé par un laboratoire accrédité à cet effet.

D.8 **Précision de l'essai**

La répétabilité r , pour des niveaux de valeurs compris entre 0,016 % et 0,336 %, est de $0,2 \cdot x + 0,02$.

Annexe E (normative)

Procédure de transposition des résultats d'essai existants de formulations de béton vers une nouvelle formulation de béton incorporant des granulats de plusieurs domaines d'extraction

Les règles de transposition suivantes s'appliquent :

Règle R1

Concernant le mélange de granulats de plusieurs domaines d'extraction, les formulations de béton utilisables montrent dans l'essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, une déformation longitudinale moyenne $\leq 0,150 \text{ ‰}$ après 20 semaines d'essai ou $\leq 0,250 \text{ ‰}$, si l'essai a dû être prolongé à 48 semaines.

Remarque: La règle R1 ne s'applique pas aux autres cas possibles de transposition selon le tableau 2.

Règle R2

Des formulations de béton sont considérées comme identiques, si, à l'exception du granulat, les exigences du tableau 2 sont remplies pour tous les autres composants. Le principe de précaution suivant est obligatoirement appliqué: Une transposition en épuisant et en combinant toutes les possibilités offertes par le tableau 2 est seulement permise si elle ne conduit pas à une augmentation du risque de RAG.

Exemple :

- formulation B1: granulat G1 avec 300 kg/m^3 ciment A et
- formulation B2: granulat G2 avec 280 kg/m^3 ciment A + 80 kg/m^3 cendres volantes.

Les deux formulations possèdent une résistance élevée à la RAG et sont considérées comme identiques selon le tableau 2. Mais les granulats G1 et G2 ne peuvent être combinées que dans la formulation B2.

Règle R3

En l'absence de résultat d'essai utilisable (règle R1 et/ou R2) pour une formulation de béton donnée avec un granulat donné d'un domaine d'extraction donné, un essai de béton complémentaire est requis avec un mélange de tous les granulats de tous les domaines d'extraction (voir aussi les règles R4 et R5).

Règle R4

La proportion du granulat pour lequel il n'y a pas de résultat individuel d'essai selon SIA 262/1:2019, annexe G, utilisable (règle R1 et/ou R2) ne peut pas être augmentée sur l'ensemble de la granularité de plus de 5 % de masse (les indications en pourcents sont des valeurs absolues).

Règle 5

Quand il existe un résultat d'essai pour une formulation de béton donnée avec un mélange défini de différents granulats provenant de plusieurs domaines d'extraction, lequel remplit la règle R1, le résultat d'essai peut être transposé sur des formulations de béton identiques (selon règle R2) pour d'autres mélanges de ces granulats, tant que les variations de proportion des granulats individuels ne dépassent pas 5 % de masse sur l'ensemble de la granularité (les indications en pourcents sont des valeurs absolues).

Information :

L'emploi d'un granulat alcali-réactif avec effet pessimum n'est pas couvert.

À ce jour, aucun granulat à effet pessimum n'a été reconnu dans les roches du territoire suisse. En tout cas, les règles de transposition du tableau 2 ne sont pas applicables et un essai de résistance à la RAG selon SIA 262/1:2019, annexe G, de la formulation prévue, incluant ce granulat (dosage exact et courbe granulométrique), doit être réalisé. Des informations supplémentaires se trouvent dans LCPC 1994 [3].

Tableau 10 Principes généraux de procédure en cas de mélange de granulats de plusieurs domaines d'extraction

	Essai Microbar	Alcali-réactivité du granulat	Essai de résistance à la RAG	Résistance à la RAG du béton	Conclusion
Cas 1	disponible →	non réactif (G1)	pas nécessaire →	donnée pour (G1 Bn)	Toute formulation à base d'un mélange de G1 et G2 est possible sans justification (G1 G2 Bn).
	disponible →	non réactif (G2)	pas nécessaire →	donnée pour (G2 Bn)	
Le mélange de granulats non alcali-réactifs (2 ou plus) de plusieurs domaines d'extraction est possible sans aucune limitation dans toutes les formulations de béton. Remarque: L'essai Microbar n'est pas utilisable pour des granulats alpins (selon le chiffre D.5).					
Cas 2	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G3)	disponible →	R1 satisfait pour (G3 B1)	La résistance à la RAG de la formulation B1 avec un mélange de G3 et G4 est prouvée sans essai supplémentaire (G3 G4 B1).
	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G4)	disponible →	R1 satisfait pour (G4 B1)	
Mélanger des granulats G3 et G4 potentiellement alcali-réactifs de plusieurs domaines d'extraction est possible sans aucune limitation dans la formulation B1 ou d'autres formulations identiques selon la règle R2, pour autant que la formulation B1 remplit la règle R1 pour chacun des granulats testé séparément.					
Cas 3	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G5)	disponible →	R1 non satisfait pour (G5 B2)	La résistance à la RAG de la formulation B2 avec un mélange de G5 et G6 n'est pas prouvée sans essai supplémentaire (G5 G6 B2).
	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G6)	disponible →	R1 non satisfait pour (G6 B2)	
Le mélange de granulats potentiellement alcali-réactifs de plusieurs domaines d'extraction qui, séparément, ont produit dans la formulation B2 un résultat d'essai qui ne remplit pas la règle R1, ne permet pas forcément d'obtenir une formulation B2 à résistance élevée à la RAG. Selon la règle R3, un essai de résistance à la RAG supplémentaire est nécessaire. En cas d'un nouvel essai d'une formulation avec un mélange des granulats (G5 G6 Bn) qui remplit la règle R1, la règle R5 peut être appliquée.					
Cas 4	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G7)	indisponible/ disponible →	R1 et/ou R2 non satisfait pour (G7 B3)	La résistance à la RAG de la formulation B3 avec un mélange G7 et G8 n'est pas prouvée sans essai supplémentaire. En cas d'un résultat d'essai positif (G7 G8 B3), des modifications sont admissibles sans essai supplémentaire sous respect de la règle R4.
	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G8)	disponible →	R1 satisfait pour (G8 B3)	
Règle R3: Puisqu'il n'existe pas de résultat d'essai utilisable (règle R1 et/ou R2) pour la formulation donnée B3 avec le granulat G7, un essai de béton supplémentaire est requis avec un mélange des granulats (G7 et G8 dans B3 ou identique selon règle R2). Règle R4: Dans la formulation B3 ou d'autres formulations identiques selon la règle R2, l'augmentation du dosage du granulat G7 est limitée à 5 % de masse au maximum sur l'ensemble de la granularité, en comparaison avec son dosage dans le mélange testé. Par contre le dosage du granulat G8 peut être augmenté sans limitation dans la formulation B3 ou d'autres formulations identiques selon la règle R2.					
Cas 5	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G9)	disponible →	R1 satisfait pour (G9 G10 B4)	Des modifications de la formulation B4 avec un mélange de G9 et G10 sont possibles sans essai supplémentaire sous respect de la règle R5.
	disponible/ indisponible →	potentiellement réactif (G10)			
Règle R5: Dans la formulation B4 ou d'autres formulations identiques selon la règle R2, les dosages des granulats G9 ou G10 peuvent varier sur l'ensemble de la granularité de 5 % de masse au maximum, en comparaison avec leurs dosages dans le mélange testé.					

Gn = granulat n du domaine d'extraction n; exemple: G1 = granulat du domaine d'extraction 1

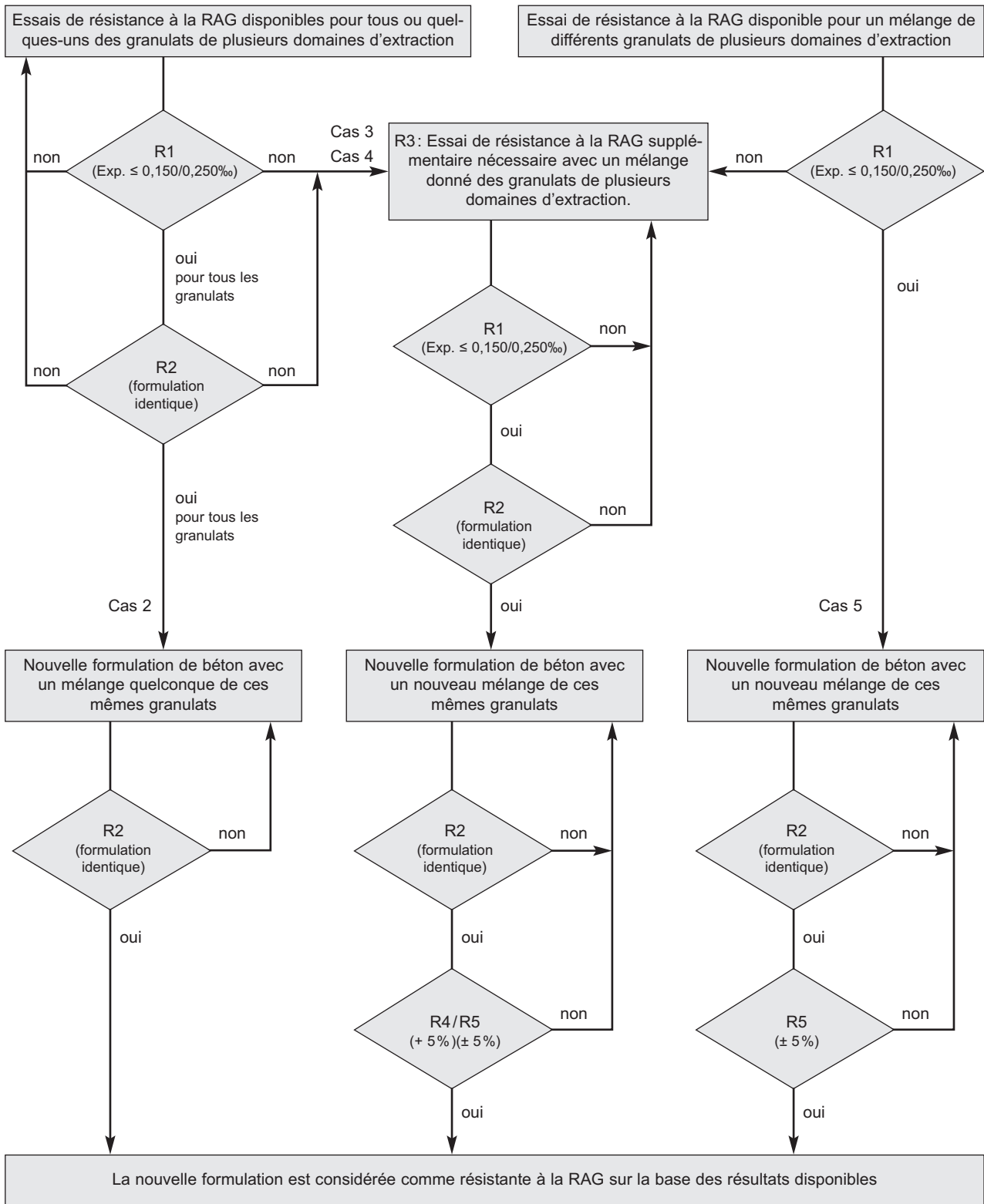
Bn = formulation de béton; exemple: B1 = formulation de béton 1

Exemple: (G1 G2 B1) = formulation du béton B1 avec les granulats G1 et G2

Résistance à la RAG: essai de la résistance à la RAG du béton selon SIA 262/1:2019, annexe G

Essai Microbar: essai de l'alcali-réactivité du granulat selon annexe D

Figure 7 Schéma de procédure pour la transposition des résultats d'essai existants des formulations de béton vers une nouvelle formulation de béton incorporant des granulats de plusieurs domaines d'extraction. Les règles R1 à R5 sont définies dans l'annexe E. Les numéros des exemples se réfèrent au cas d'exemples dans le tableau 10



Annexe F (informative)

Publications

Cette annexe mentionne diverses publications qui traitent le même sujet que le présent cahier technique.

F.1 Normes

- [1] ASTM C1260: *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. www.astm.org
- [2] AFNOR P18-594: *Granulats – Méthodes d'essai de réactivité aux alcalis*. Normalisation française. www.boutique.afnor.org

F.2 Autres Publications

- [3] LCPC 1994: *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 1994.
- [4] Documentation ASTRA 8213: *La réaction alcali-granulats (RAG). Données de base et mesures des ouvrages d'art nouveaux et existants*, Edition 2007. Le document peut être téléchargé gratuitement auprès www.astra.admin.ch.
- [5] Merz Ch., Hunkeler F. und Griesser A. (2006): *Schäden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz*, Forschungsauftrag AGB2001/471, Bericht VSS Nr. 599, Juli 2006.
- [6] Merz Ch., Leemann A. (2012): *Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung*, Forschungsaufträge AGB 2006/3 und AGB 2005/23, Bericht VSS Nr. 648, November 2012.
- [7] Merz Ch., Leemann A. (2019): *AAR-Prävention für Beton: Erfahrungen mit Zusatzstoffen*, Forschungsauftrag AGB 2016/001, Bericht VSS Nr. 694, März 2019.

Annexe G (informative)

Index des termes

Tableau 11 Index alphabétique des termes définis au chapitre 1

Français	Allemand	Chiffre
Addition	Zusatzstoff	1.1.6
Classe d'environnement (UK1, UK2, UK3)	Umgebungs-klasse (UK1, UK2, UK3)	1.1.5
Classe de prévention (PK1, PK2, PK3)	Präventions-klasse (PK1, PK2, PK3)	1.1.3
Classe de risque (RK1, RK2, RK3)	Risikoklasse (RK1, RK2, RK3)	1.1.4
Professionnel spécialisé	Fachperson	1.1.2
Réaction alcali-granulats	Alkali-Aggregat-Reaktion	1.1.1

Organisations représentées dans la commission SIA 262 et le groupe de travail SIA 2042

Empa Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche
EPFL École Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETH Zürich Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Commission SIA 262, Construction en béton

		Représentant de
Président	Walter Kaufmann, Prof. Dr., dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Zurich	ETH Zürich
Membres	Daniel Buschor, dipl. Bau-Ing. EPF/SIA, Berthoud Christoph Czaderski, Dr., dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Dübendorf Stephan Etter, Dr., dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Zurich Hans-Rudolf Ganz, Dr., dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Bösinggen Peter Lunk, Dr., Dipl. Ing. TU, Würenlingen Aurelio Muttoni, Prof. Dr., ing. civil dipl. EPF/SIA, Lausanne Sylvain Plumey, Dr., ing. dipl. EPF/SIA, Porrentruy Yves Schiegg, Dr., dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Wildegg Kerstin Wassmann, Dipl. Ing. TU, Würenlingen Hannes Wegscheider, Dipl. Bau-Ing. TU, Schlieren Volker Wetzig, Dipl. Ing. TU/SIA, Berne	Bureau d'études Empa Bureau d'études Bureau de conseils Industrie EPFL Bureau d'études Laboratoire de matériaux Industrie Entreprise Industrie
Procès-verbal	Simon Karrer, MSc ETH Bau-Ing., Zurich	

Groupe de travail SIA 2042

Présidence	Peter Lunk, Dr., Dipl. Ing. TU, Würenlingen	Industrie
Membres	Stéphane Cuchet, dipl. Géol. UNIL, Eclépens Christine Merz, Dr., dipl. Geol. UNIL/UNINE/SIA, Möriken Marc Rohr, Betontechnologe HTA, Tuggen Yves Schiegg, Dr., dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Wildegg Jörg Steck, Betoningenieur FHNW, Winterthour Simon Tanner, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Zurich Alain Waldmeyer, ing. civil dipl. EPF/SIA, Cottens Roland Weiss, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Wildegg	Industrie Bureau d'études Industrie Laboratoire de matériaux Industrie Bureau d'études Bureau d'études Certification

Responsable
Bureau SIA

Heike Mini, dipl. Bau-Ing. TU/SIA, Zurich

Adoption et validité

La Commission centrale des normes de la SIA a adopté le présent cahier technique SIA 2042 le 10 mars 2022.

Il est valable dès le 1^{er} mai 2022.

Il remplace le cahier technique SIA 2042 *Prévention des désordres dus à la réaction alcali-granulats (RAG) dans les ouvrages en béton*, édition 2012.

Copyright © 2022 by SIA Zurich

Tous les droits de reproduction, même partielle, de copie intégrale ou partielle, d'enregistrement ainsi que de traduction sont réservés.