

TECHNIQUES ET MÉTHODES

Recommandations
pour la durabilité
des bétons durcis
soumis au gel

Environnements
hivernaux rigoureux



guide technique

Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel

**Environnements
hivernaux rigoureux**

Octobre 2021



TECHNIQUES ET MÉTHODES

Auteurs

Université Gustave Eiffel et Cerema

Coordinateurs de la publication

BAROGHEL-BOUNY Véronique (Université Gustave Eiffel)
DIERKENS Michaël (Cerema)

Contributeurs

AIT ALAIWA Abdelgafour (Vinci construction grands projets)
BAROGHEL-BOUNY Véronique (Université Gustave Eiffel)
BESSE Frank (Vicat)
BOULET Bruno (Cerema)
BOUTEILLE Sébastien (Cetu)
CORDIER Nathalie (Cerema)
CUSSIGH François (FNTP)
DENK Olivier (Egis)
DIERKENS Michaël (Cerema)
FEN-CHONG Teddy (Université Gustave Eiffel)
IZORET Laurent (Atilh)
LINGER Lionel (Vinci construction grands projets)
MAI-NHU Jonathan (Cerib)
POTIER Jean-Marc (SNBPE)
ROUGEAU Patrick (Cerib)

Comment citer cet ouvrage :

Université Gustave Eiffel et Cerema, Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel - Environnements hivernaux rigoureux, Marne-la-Vallée, Université Gustave Eiffel, 2021. Techniques et méthodes, GT16, 120 pages, ISBN 978-2-85782-754-2.

Université Gustave Eiffel
www.univ-gustave-eiffel.fr

Les collections de l'Ifsttar
techniques et méthodes – guide technique - Référence : GT16

ISBN 978-2-85782-754-2 – ISSN 2492-5438



Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution.
Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
Les termes de cette licence sont accessibles à l'adresse :
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Sommaire

Introduction	7
Domaine d'application	11
Chapitre 1. Les dégradations par le gel, avec ou sans sels de déverglaçage	13
1.1 Types de pathologies	13
1.2 Gel interne.....	13
1.3 Ecaillage.....	16
1.4 Facteurs d'influence	16
1.4.1 Réseau de bulles d'air et rapport $E_{\text{eff}} / \text{Liant eq}$	16
1.4.2 Constituants du béton.....	17
1.4.3 Mise en œuvre et maturation.....	17
Chapitre 2. Démarche préventive et détermination du niveau de prévention	19
2.1 Démarche préventive	19
2.2 Catégories d'ouvrage	21
2.3 Classes d'exposition vis-à-vis des risques de désordres dus au gel avec ou sans sels de déverglaçage	21
2.3.1 Définition des zones d'intensité de gel d'un site	21
2.3.2 Définition des fréquence de salage d'une chaussée routière	21
2.3.3 Notion d'exposition d'une partie d'ouvrage	24
2.3.4 Classe d'exposition des parties d'ouvrages XF1 à XF4	25
2.4 Niveaux de prévention vis-à-vis de la durabilité aux effets du gel avec ou sans sels.....	26
Chapitre 3. Démarche d'assurance qualité	27
3.1 Management de la qualité.....	27
3.2 Les acteurs.....	28
3.2.1 Le maître d'ouvrage	28
3.2.2 Le maître d'œuvre.....	28
3.2.3 L'entreprise	30
3.2.4 Le prescripteur.....	30
3.2.5 Le producteur	31
3.2.6 Les laboratoires d'essais	31
3.3 Les épreuves d'étude, de convenance et de contrôle	31

Chapitre 4. Spécifications des constituants	33
4.1 Granulats.....	33
4.1.1 Granulats courants.....	33
4.1.2 Autres granulats.....	33
4.2 Ciments	34
4.3 Additions.....	35
4.4 Eau de gâchage	36
4.5 Adjuvants.....	36
4.6 Fibres	36
4.7 Ajouts	36
Chapitre 5. Exigences relatives à la formulation des bétons	37
5.1 Bétons coulés ou extrudés.....	37
5.2 Utilisation d'adjuvants entraîneurs d'air	38
Chapitre 6. Méthodes d'essais	39
6.1 Représentativité des prélèvements.....	39
6.2 Essais sur béton frais.....	39
6.2.1 Consistance	39
6.2.2 Teneur en air occlus	39
6.3 Résistances en compression	40
6.4 Essais de durabilité	40
6.4.1 Généralités.....	40
6.4.2 Description sommaire des essais de durabilité.....	41
6.4.3 Échéances de mise en enceinte climatique pour la réalisation des essais de performance.....	41
Chapitre 7. Critères de conformité	43
7.1 Consistance	43
7.2 Teneur en air occlus des bétons formulés avec un adjuvant entraîneur d'air ...	43
7.2.1 Épreuves d'étude et de convenance	43
7.2.2 Épreuves de contrôle	43
7.3 Résistance en compression	44
7.4 Essais de performance et facteur d'espacement.....	45

Chapitre 8. Épreuves	47
8.1 Études et références	48
8.1.1 Épreuve d'étude.....	48
8.1.2 Références probantes d'utilisation au sens de la durabilité au gel avec ou sans sels	50
8.1.3 Références probantes partielles d'utilisation au sens de la durabilité au gels avec ou sans sels.....	51
8.2 Épreuve de convenance	52
8.2.1 Conduite de l'épreuve de convenance	52
8.2.2 Ajustement de la quantité des constituants pendant l'épreuve de convenance ...	53
8.2.3 Convenances simplifiées complémentaires	53
8.2.4 Critères de conformité des épreuves de convenance.....	53
8.3 Contrôle intérieur.....	57
8.3.1 Contrôle de production	57
8.3.2 Contrôle à la mise en œuvre	57
Chapitre 9. Fabrication	59
Chapitre 10. Mise en œuvre	61
Annexe A	
Autres formulations utilisables	63
Annexe B	
Compléments techniques.....	79
Références	107
Termes et définitions	113
Bibliographie	117
Fiche bibliographique	119
Publication data form	120

Introduction

De nombreux gestionnaires d'ouvrages sont confrontés aux conséquences, quelquefois très pénalisantes, des cycles de gel-dégel sur la durabilité du béton. Murs de soutènement, ouvrages d'art, structures de génie civil des remontées mécaniques, et même quelquefois certains bâtiments et parkings, construits avec des bétons inadaptés, sont ainsi fortement agressés. La nécessité de maintenir une bonne viabilité hivernale des itinéraires routiers et autoroutiers oblige à répandre sur les chaussées, à titres préventif et curatif, d'importantes quantités de sels de déverglaçage. La combinaison des cycles de gel-dégel et des sels de déverglaçage peut aggraver notablement les dégradations du béton.

Les structures construites en altitude ne sont pas les seules à subir des dégradations dues au gel. Certaines régions, classées en gel modéré, sont également concernées notamment du fait d'une fréquence plus élevée des cycles de gel-dégel. On constate assez fréquemment dans ces régions une dégradation de surface des bétons par écaillage.

Dès 1987, un groupe de travail connu sous le sigle GRA (groupe Rhône-Alpes) comprenant des maîtres d'œuvre et des laboratoires privés et publics de la région Rhône-Alpes, a engagé des études et proposé des solutions. Les résultats de cette réflexion ont été concrétisés en mars 1992 par un document intitulé *recommandations spécifiques à l'élaboration des bétons pour les parties d'ouvrage non protégées des intempéries et soumises à l'action du gel*.

Le LCPC et le Sétra ont ensuite décidé de généraliser l'application de ces recommandations au plan national, en adaptant les spécifications à l'environnement des différentes régions françaises. L'évolution des constituants des bétons, les nombreux retours d'expérience et les échanges entre spécialistes ont permis d'approfondir les connaissances et de faire évoluer les recommandations de mars 1992. Ce travail d'ensemble a conduit à la publication par le LCPC d'un guide technique *les recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel*, de décembre 2003. Par rapport aux recommandations du GRA, les classes d'exposition ainsi que les niveaux de salage ont été pris en compte, la gamme des ciments utilisables a été élargie, les seuils des valeurs de l'écaillage à respecter sont plus adaptés au retour d'expérience. Différentes catégories de bétons (bétons traditionnels, bétons à hautes performances, bétons destinés aux produits fabriqués par démoulage immédiat et par moulage *in situ*) ont été traitées. Aujourd'hui, on constate que les parties d'ouvrages construites en appliquant ces recommandations présentent un très bon comportement aux cycles gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

Depuis la publication des recommandations de 2003, des évolutions importantes ont eu lieu dans la manière de prescrire et d'utiliser les bétons. Celles-ci ont porté notamment sur une clarification de la définition des classes d'exposition liées au gel (XF1 à XF4), la modification des conditions d'emploi des additions et la prise en compte des dégradations liées aux réactions sulfatiques internes. Parallèlement, de nombreuses normes et textes de références (constituants, essais, norme NF EN 206/CN, *fascicule 65 du CCTG travaux*) ont évolué, nécessitant une remise à jour des recommandations de 2003. Des retours d'expérience ont également montré que plusieurs chapitres pouvaient être sujets à des interprétations multiples, complexifiant ainsi les relations entre entreprises et maîtres d'œuvre en phase chantier.

Un travail de révision a donc été engagé. Les objectifs visés étaient les suivants :

- simplification de la structure du document,
- mise à jour normative,
- prise en compte des derniers développements issus de la recherche,
- clarification des modalités de prescription des niveaux de prévention G et G + S,
- prise en compte de l'évolution des constituants et des règles de formulation,
- ouverture vers une démarche plus axée sur des validations performantielles,
- clarification du contenu des étapes de validation (études, convenances et contrôles).

Les régions classées en gel sévère sont concernées, celles classées en gel modéré le sont uniquement lorsque les itinéraires sont traités avec des sels de déverglaçage (essentiellement NaCl et CaCl₂). Les conditions d'application détaillées sont précisées au chapitre 2.

Pour un ouvrage neuf, construit dans les règles de l'art, le principe de prévention retenu repose sur le fait que le béton doit résister par ses seules performances (et non *via* une protection externe) aux dégradations dues au gel avec ou sans sels.

Note – Bien que certaines protections puissent être efficaces vis-à-vis de l'écaillage, aucune d'entre elles n'offre à ce jour la garantie d'une bonne efficacité sur la durée totale d'utilisation de l'ouvrage sans renouvellement régulier.

La démarche proposée constitue une approche globale, prenant en compte des spécifications renforcées sur :

- le choix des constituants (granulats non gélifs, types de ciments, d'additions, recours à un agent entraîneur d'air),
- les limites de composition des bétons (dosage en liant équivalent minimal, rapport maximal $E_{eff} / \text{liant eq}$, taux de substitution maximal en addition, quantité d'air occlus minimale),
- les propriétés des bétons (résistance mécanique de la pâte suffisante, structure du réseau poreux),
- le contenu des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle,
- les essais de caractérisation et les valeurs associées pour prononcer la conformité.

Elle n'est donc pas purement performantielle, mais constitue un exemple d'approche « hybride » ou mixte, basée à la fois sur :

- des exigences prescriptives : exclusions de certains constituants incompatibles avec une bonne résistance au gel, renforcement des limites de composition des bétons,
- des résultats d'essais : essais de performance servant de référence, indicateurs de substitution.

Trois stratégies peuvent être envisagées en termes de formulation :

- formuler des bétons avec une porosité suffisamment faible, de manière à limiter la quantité d'eau gelable. Dans ce cas, il n'est pas toujours nécessaire d'incorporer de l'air entraîné pour garantir la résistance au gel, ce qui facilite l'obtention des résistances en compression et limite le risque de corrosion des armatures,
- formuler des bétons en utilisant un adjuvant entraîneur d'air, de manière à générer un réseau de fines bulles d'air uniformément réparties dans la pâte cimentaire, permettant ainsi une meilleure répartition des pressions hydrauliques,
- formuler des bétons en utilisant des billes plastiques déformables à la place d'un adjuvant entraîneur d'air.

Pour chacune de ces stratégies, la méthodologie de validation est déclinée en tenant compte du niveau de sécurité qu'offre la formulation du point de vue de la résistance au gel avec ou sans sels.

Les présentes recommandations doivent être explicitement spécifiées dans les documents particuliers du marché (DPM) pour être applicables.

Elles ont été établies pour les ouvrages de génie civil construits dans le cadre des marchés publics, pour lesquels les cahiers des clauses techniques générales s'appliquent et en particulier le *fascicule 65 du CCTG travaux*. Elles peuvent également être adoptées à la demande des maîtres d'ouvrage pour des structures spécifiques.

Elles peuvent aussi servir de référence dans les marchés privés, à condition que ces derniers précisent les conditions d'application du *fascicule 65 du CCTG travaux*.

Lorsque l'application de ces recommandations est prévue dans le marché, celui-ci doit préciser en plus du niveau de prévention G ou G + S associé aux parties d'ouvrages concernées, les données caractérisant l'environnement dans lequel sont situées les différentes parties de l'ouvrage (niveau de gel, de salage et de saturation en eau) ainsi que les classes d'exposition qui leur sont associées.

Le document est structuré de la manière suivante :

- le domaine d'application des présentes recommandations est détaillé dans le chapitre éponyme,
- le chapitre 1 expose les bases phénoménologiques utiles pour la compréhension et les moyens de prévention des mécanismes de dégradation par gel avec ou sans sels, des compléments sont fournis en annexe B1,
- **les chapitres 2 à 10 présentent la méthode de validation utilisable dans le cas général,**
- l'annexe A présente des méthodes de validations associées à des formulation alternatives,
- l'annexe B apporte des compléments méthodologiques ou bibliographiques,
- les références à des textes normatifs ou techniques sont présentées dans le chapitre « Références »,
- les symboles, termes et définitions sont détaillés dans le chapitre « Termes et définitions ».

Niveau de l'utilisation des présentes recommandations :

- **les parties rédigées dans le corps de texte, ainsi que les tableaux et figures associés, constituent la partie prescriptive du document, applicable dès lors que les présentes recommandations sont citées dans les documents du marché,**
- **les notes dans les tableaux et les notes de bas de tableaux font pleinement partie de la prescription,**
- **les autres notes sont informatives (explications ou précisions complémentaires).**

Domaine d'application

En complément des dispositions normatives visant à assurer la durabilité du béton dans les ouvrages, en particulier celles de la norme NF EN 206/CN ou celles des normes de produits préfabriqués en béton, le présent document donne des dispositions destinées à prévenir les phénomènes de dégradation par des cycles de gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage.

Les présentes recommandations concernent les bâtiments non courants et les structures de génie civil. Elles s'appliquent aux bétons destinés aux structures coulées en place, aux structures constituées de produits préfabriqués, ainsi qu'aux bétons destinés aux produits préfabriqués.

Elles ne s'appliquent qu'aux parties d'ouvrages ayant une classe d'exposition :

- **XF3, associée à un niveau de prévention G au sens du § 2.4,**
- **XF4, associée à un niveau de prévention G + S au sens du § 2.4.**

Les niveaux d'exigences formulés dans ces recommandations sont adaptés aux ouvrages relevant du *fascicule 65 du CCTG travaux*, en visant une durée d'utilisation de projet de 100 ans pour un ouvrage d'art par exemple. Pour les autres ouvrages, il est de la responsabilité du maître d'ouvrage d'ajuster les niveaux d'exigences à l'importance de leurs ouvrages et à la durée d'utilisation de projet souhaitée. **De manière générale, ces recommandations n'ont pas vocation à être appliquées pour des parties d'ouvrages de bâtiment courants** (durée d'utilisation de projet fixée par la norme NF EN 206/CN : 50 ans).

Le béton relevant des présentes recommandations peut être :

- lourd ou de masse volumique normale au sens de la norme NF EN 206/CN,
- fabriqué sur chantier, prêt à l'emploi ou produit dans une usine de fabrication de produits préfabriqués,
- formulé avec ou sans air entraîné,
- pompable,
- vibré, autoplaçant ou projeté.

Les présentes recommandations spécifient des exigences pour :

- les constituants du béton,
- les propriétés du béton frais et du béton durci et leur contrôle,
- les limitations imposées à la composition du béton,
- la livraison du béton frais,
- les procédures de contrôle de production et à la mise en œuvre,
- les critères de conformité et l'évaluation de la conformité.

Les présentes recommandations ne s'appliquent pas :

- au mortier,
- au béton aéré,
- au béton mousse,
- au béton drainant,
- au béton léger au sens de la norme NF EN 206/CN et au béton de masse volumique inférieure à 800 kg/m³,
- au béton réfractaire,
- au béton de bois,

- au béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) (au sens de la norme NF P 18-470),
- au béton de chaussée routière et aéroportuaire,
- au béton soumis à des fondants non ioniques, pour la résistance à l'écaillage,
- aux bétons formulés avec des granulats récupérés ou recyclés.

Note – En cas d'utilisation de fondants non ioniques, la démarche associée au niveau de prévention G est applicable. En ce qui concerne la prévention de l'écaillage (niveau de prévention G+S), l'essai de performance selon la norme XP P 18-420 n'est pas adapté à ce type de fondant. Une démarche analogue à celle présentée dans le présent document est néanmoins possible, sous réserve de sélectionner un essai de performance adapté.

Certains produits préfabriqués en béton sont couverts par des normes européennes harmonisées qui n'utilisent pas les classes d'exposition de la norme NF EN 206/CN. Ces produits préfabriqués portent le marquage CE et les exigences applicables en fonction des environnements découlent de prescriptions utilisant des classifications différentes. **Sauf dispositions contraires mentionnées dans les clauses du marché, ces produits préfabriqués ne sont pas concernés par le présent document.** Il convient alors de se référer à la norme du produit.

Ce document concerne le gel du béton durci. La prévention des pathologies liées au gel du béton frais ou en cours de prise ou de durcissement relève de l'application des règles de l'art.

Les présentes recommandations ne couvrent pas les exigences relatives à la santé et à la sécurité pour la protection des opérateurs lors de la production, de la livraison et de la mise en œuvre de béton.

Chapitre 1

Les dégradations par le gel, avec ou sans sels de déverglaçage

1.1 Types de pathologies

Lorsqu'ils sont exposés à une ambiance hivernale, les ouvrages en béton peuvent être confrontés à deux types de dégradations :

- **le gel interne** qui se traduit par une dégradation de la pâte cimentaire dans la masse du béton.
- **L'écaillage** qui se traduit par une détérioration à la surface exposée du béton.

Les paramètres d'exposition les plus influents dans ces deux modes de dégradation sont :

- **les cycles de gel-dégel** et notamment la température minimale et le nombre de cycles.
- L'eau, qui présente des propriétés complexes de changement de phase dont une expansion volumique supérieure à 9 % lors de sa transformation en glace ; son rôle est majeur au sein du milieu poreux constitué par le béton pour le gel interne mais également à la surface du matériau pour l'écaillage.
- Les agents agressifs et en particulier **les sels de déverglaçage** répandus en surface pour l'écaillage.

En fonction des paramètres d'exposition communs ou spécifiques et de la formulation du béton, on peut observer une détérioration par gel interne ou par écaillage, voire les deux simultanément.

Un béton formulé sans aucune précaution et exposé à un environnement hivernal peut présenter une forte dégradation dès le premier hiver. Il est important de noter qu'aucune réparation n'est possible dans le cas d'une pathologie de type gel interne.

Les conséquences liées à l'écaillage sont rarement structurelles mais plutôt esthétiques. Toutefois, les possibilités de chute de matériau en particulier pour les corniches de ponts, peuvent engager la sécurité des usagers. L'écaillage induit une perte de section du béton et de l'enrobage des armatures, favorise la pénétration d'agents agressifs et dégrade la pâte cimentaire. Cette problématique est plus fréquente que la dégradation par le gel interne sur les ouvrages récents.

Certains compléments à la présentation des mécanismes ci-dessous sont apportés en Annexe B1.

1.2 Gel interne

Lorsqu'un béton présentant un degré de saturation interne en eau élevé est exposé à des cycles de gel-dégel, une micro-fissuration affaiblissant la cohésion de la pâte cimentaire peut se développer et se propager. On constate alors une diminution des caractéristiques mécaniques du matériau : chute du module d'élasticité, des résistances à la compression et à la traction.

Au cours d'un abaissement de température, la transformation de l'eau en glace apparaît progressivement dans les pores de diamètre de plus en plus petit. L'expansion de 9 % de l'eau pendant sa solidification génère une pression sur la phase liquide restante. Pour

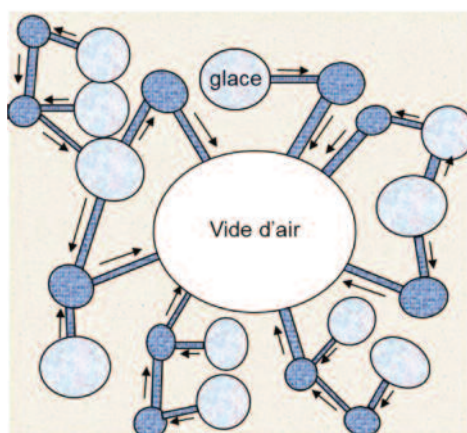
un béton ne contenant pas d'air entraîné, on constate alors un gonflement général. La détérioration s'amorce lorsque la pression hydraulique devient supérieure à la résistance en traction de la pâte cimentaire, ce qui provoque une microfissuration de cette dernière. Ce mécanisme est à l'origine de l'élaboration de la première théorie développée par Powers (1953), dite des pressions hydrauliques, sur le gel des bétons.

Avec l'augmentation du nombre de cycles de gel-dégel, la microfissuration se développe et on mesure un gonflement du matériau dans la masse. Une fissuration apparaît, facilitant la pénétration des agents agressifs et le risque de corrosion des armatures.

La dernière étape de cette dégradation est la décohésion du matériau avec l'érosion de la pâte cimentaire, entraînant ensuite le déchaussement des granulats.

Au cours d'un cycle de gel, l'eau libre, mise en pression par la glace en formation, trouvera un exutoire si le réseau capillaire est connecté à un volume permettant son expansion et si le chemin à parcourir n'est pas trop long pour limiter les pertes de charges. L'incorporation d'un réseau de microbulles d'air, d'une dimension de quelques microns à 1 millimètre, permet de créer des réservoirs d'expansion pour la phase liquide sous pression (figure 1). L'efficacité de ce réseau de bulle d'air dépend de sa répartition au sein de la pâte cimentaire. Ce paramètre majeur est traduit par le facteur d'espacement, également appelé L_{barre} , qui représente la demi-distance moyenne entre deux bulles d'air dans la pâte cimentaire.

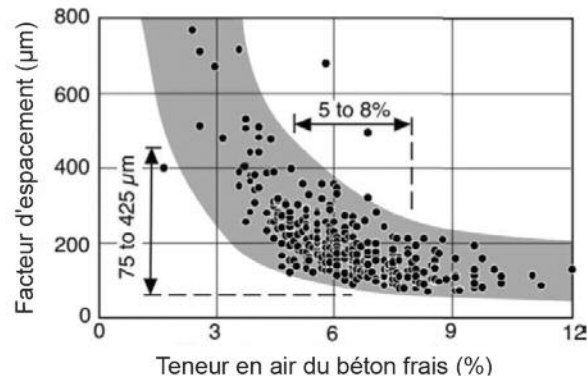
Figure 1
Pression hydraulique liée à l'expansion de la formation de glace :
transfert hydrique de la phase liquide au travers du réseau de
plus faible diamètre (Fen-Chong, 2008)



Le volume cumulé des vides d'air est également un indicateur couramment utilisé pour caractériser le réseau poreux, du fait de sa facilité d'obtention. Toutefois, ce dernier n'apporte qu'une information partielle car il est réalisé sur béton frais et ne traduit pas la répartition de ce volume au sein de la pâte cimentaire à l'état durci. On note sur la figure 2 que pour une quantité d'air occlus comprise entre 5 et 8 % du volume de béton, le L_{barre} peut varier de 75 à 425 μm . Ainsi, une valeur d'air occlus supérieure à 4 % est une condition nécessaire pour assurer une bonne résistance au gel d'un béton courant, mais pas forcément suffisante.

Il est nécessaire que les bulles d'air soient suffisamment rapprochées afin que les contraintes internes générées par le gel soient inférieures à la résistance de la pâte.

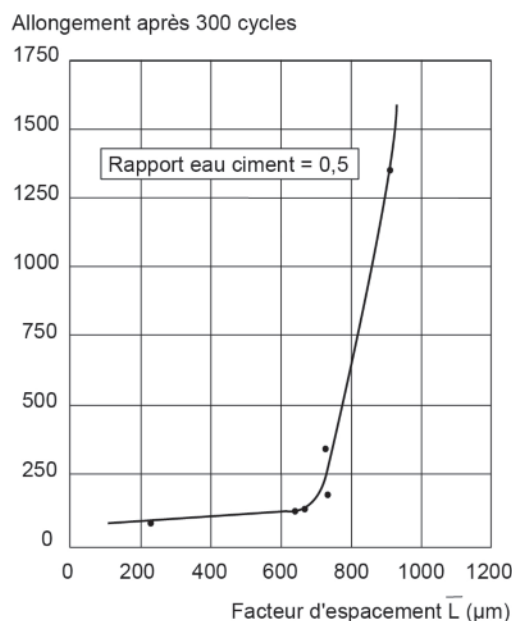
Figure 2
Relation entre mesure d'air occlus (béton frais) et L_{barre} (béton durci) sur plus de 600 bétons (adapté d'après Pleau *et al.*, 2001)



De nombreuses campagnes expérimentales ont permis d'établir que pour un béton courant, il existe un L_{barre} seuil appelé L_{critique} au-delà duquel la distance moyenne entre les bulles d'air devient trop élevée pour que le réseau de bulles d'air puisse assurer son rôle de vase d'expansion. Lorsque le L_{barre} est supérieur à cette valeur limite, la protection au gel d'un béton saturé n'est plus assurée (figure 3).

En revanche, certains bétons, caractérisés par un rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq}$ très bas, contiennent une très faible quantité d'eau libre susceptible de se transformer en glace. Leur forte compacité réduit considérablement les risques d'absorption d'eau venant de l'extérieur. Dans ces conditions, ces bétons résistent généralement bien aux cycles de gel-dégel sans qu'il y ait besoin de réseau de bulles d'air.

Figure 3
Relation entre le facteur d'espacement des vides d'air et l'allongement après 300 cycles de gel-dégel avec $E/C = 0,5$ (adapté d'après Pigeon et Lachance, 1981)



1.3 Écaillage

La surface d'un béton peut se dégrader sous l'effet conjugué de la présence d'eau, de sels de déverglaçage et de cycles de gel-dégel. Le phénomène se traduit par la perte en surface de petites écailles localisées de pâte cimentaire. Ensuite, les granulats présents sous la pâte cimentaire apparaissent et lorsque la dégradation devient très importante, ils peuvent être déchaussés. Il s'agit d'une dégradation externe qui attaque la surface exposée du béton.

La dégradation laisse apparaître très rapidement les granulats à la limite de la surface exposée, ce qui suggère à tort que la qualité du granulat en est pleinement responsable. Les granulats peuvent avoir une influence mais des pâtes cimentaires sans granulat et des mortiers avec des sables non gelifs peuvent également subir cette dégradation.

L'identification des mécanismes à l'origine de la détérioration nécessite une dissociation phénoménologique difficile entre l'endommagement à cœur du béton et les phénomènes de surface.

1.4 Facteurs d'influence

Les paramètres d'exposition les plus influents sur la résistance au gel et à l'écaillage sont les caractéristiques des cycles de gel-dégel, le nombre de cycles appliqués et la quantité d'eau et de sels de déverglaçage.

D'autres paramètres intrinsèques au matériau ou liés à sa mise en œuvre ont une influence sur la durabilité d'un béton aux cycles de gel-dégel. Les principaux sont cités ci-dessous.

1.4.1 Réseau de bulles d'air et rapport $E_{eff} / \text{Liant eq}$

Le rapport $E_{eff} / \text{Liant eq}$ est un paramètre de premier ordre, influant sur la résistance de la matrice cimentaire et la quantité d'eau gelable contenue dans les pores capillaires. Les caractéristiques du réseau de bulles d'air, comme indiqué au § 1.2 ont une grande influence sur la résistance au gel. La figure 4 permet d'identifier différents comportements d'un béton aux cycles de gel-dégel en fonction du rapport $E_{eff} / \text{Liant eq}$ et du facteur d'espacement, que l'on peut transposer de la manière suivante en termes de rapport $E_{eff} / \text{Liant eq}$:

$E_{eff} / \text{Liant eq} < 0,32$:

le béton est résistant aux cycles de gel-dégel même en l'absence de précaution particulière. En effet, la matrice cimentaire présente une résistance mécanique élevée associée à une très faible quantité d'eau gelable dans les capillaires.

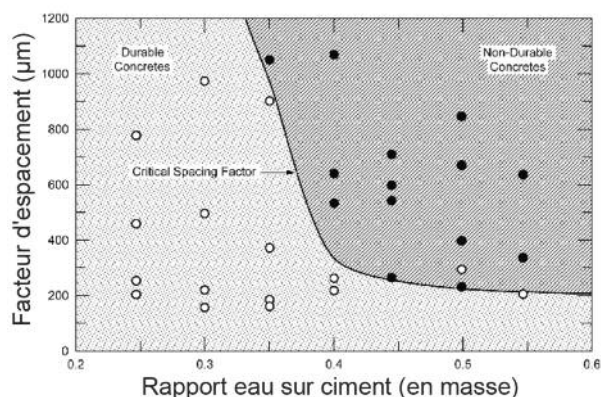
$0,32 \leq E_{eff} / \text{Liant eq} \leq 0,50$:

sans aucune précaution particulière la résistance du béton aux cycles de gel-dégel est incertaine. La résistance mécanique du béton, bien qu'importante, s'affaiblit. La connectivité du réseau poreux et la quantité d'eau résiduelle post hydratation augmentent. De plus, le degré de saturation peut s'élever avec l'accroissement de la perméabilité. La résistance au gel doit être assurée par le rôle protecteur du réseau de bulles d'air.

$E_{eff} / \text{Liant eq} > 0,50$:

il est très difficile d'assurer une bonne résistance au gel en raison de la forte quantité d'eau gelable et de la présence d'un réseau poreux qui augmente la perméabilité. L'utilisation d'un agent entraîneur d'air n'est pas une mesure suffisante pour obtenir un béton résistant aux cycles de gel-dégel.

Figure 4
Durabilité des bétons en fonction du rapport E/C et du facteur d'espacement après 300 cycles de gel-dégel, d'après les travaux de Okada *et al.* (1981) présenté par Korhonen (2002)



1.4.2 Constituants du béton

Tous les constituants d'un béton ont une influence sur sa résistance au gel et à l'écaillage.

D'une part, certains constituants du ciment autres que le clinker, de même que les additions, peuvent réduire la résistance au gel et à l'écaillage d'un béton. Les imbrulés des cendres volantes peuvent en particulier modifier l'efficacité des adjuvants entraîneur d'air et limiter la quantité d'air entraîné dans le béton. De manière générale, la nature des constituants et les taux de substitution associés sont donc encadrés en fonction des retours d'expérience afin de profiter des possibilités offertes par ces constituants minéraux tout en conservant une durabilité adaptée du béton.

D'autre part, les granulats présentent des propriétés poro-mécaniques similaires à celles de la matrice cimentaire et, de la même manière, peuvent être sensibles au gel, avec ou sans sels. Du point de vue de la résistance au gel-dégel, la principale propriété recherchée dans un granulats est donc une faible capacité d'absorption d'eau.

1.4.3 Mise en œuvre et maturation

Durant le malaxage, le transport, la mise en place (notamment en cas de pompage), et jusqu'au durcissement du béton, il est nécessaire de s'assurer de la stabilité de l'air occlus dans le béton frais. Il faut également noter que la quantité d'air entraîné peut varier en fonction de la composition du béton et des conditions de fabrication (matériel, températures) et de transport.

L'impact des modalités d'exposition aux conditions ambiantes et de cure du béton est démontré pour les essais en laboratoire et se vérifie lors des réalisations sur chantier. On retiendra en particulier l'influence sur l'écaillage de la carbonatation et des alternances humidification-séchage.

L'emploi d'un coffrage induit une modification des propriétés du béton à l'approche de la paroi. Il peut en résulter l'apparition d'arrangements granulaires spécifiques ou une répartition hydrique différentielle en cours d'hydratation (c'est par exemple le cas avec certaines peaux coffrantes), susceptibles d'influencer dans un sens ou dans l'autre la résistance du béton à l'écaillage. Il en est de même dans le cas d'une mauvaise application d'agents de démoulage sur le coffrage.

Enfin, l'âge du béton au moment de la première exposition au gel, est un paramètre important.

Chapitre 2

Démarche préventive et détermination du niveau de prévention

Les présentes recommandations définissent les prescriptions à mettre en œuvre pour assurer la durabilité au gel avec ou sans sels des bétons soumis à une classe d'exposition XF3 associée au niveau de prévention G ou XF4 associée au niveau de prévention G + S.

Elles se basent donc sur les deux niveaux de prévention **G et G + S**, définis dans le présent chapitre.

Afin de mieux prendre en compte les évolutions normatives, une aide à la prescription pour des bétons soumis à des classes d'exposition XF1 à XF4 est également proposée.

2.1 Démarche préventive

En France, pour les bétons relevant de la norme NF EN 206/CN, la prévention vis-à-vis des dégradations liées au gel avec ou sans sels s'appuie sur la définition d'une classe d'exposition XF1 à XF4, qui renvoie à des spécifications sur les constituants et à des limites de composition pour le béton.

Note – Ces classes d'exposition sont également une donnée d'entrée qui conduit à la détermination de l'enrobage conformément à la norme NF EN 1992-1-1.

Cette norme s'applique à des bétons destinés à des structures ayant une durée d'utilisation de projet de 50 ans. Pour des durées plus importantes, ces exigences sont renforcées par des prescriptions plus sévères au niveau des limites de composition des bétons. C'est le cas, par exemple, des exigences prescrites dans le *fascicule 65 du CCTG travaux*, qui s'appliquent à des ouvrages de génie civil conçus pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

La démarche proposée par les présentes recommandations s'applique dans le cas où le maître d'ouvrage :

- considère que la résistance au gel avec ou sans sels constitue un enjeu important pour tout ou partie de la structure,
- souhaite valider la résistance au gel avec ou sans sels par des résultats d'essais,
- souhaite une meilleure maîtrise de l'impact de la variabilité de la composition du béton en phase travaux.

La démarche préventive se structure alors en deux temps. La première étape consiste à déterminer le niveau de prévention à atteindre pour chaque partie d'ouvrage concernée (chapitre 2), correspondant à un ensemble de spécifications prescriptives et/ou performantielles, caractérisant le béton vis-à-vis de sa résistance au gel avec ou sans sels. On applique ensuite la ou les solutions possibles, en fonction du niveau de prévention retenu pour chaque béton (chapitres 3 à 10).

Note – L'annexe A présente quelques solutions alternatives permettant de diversifier le panel de réponses possibles en cas d'incompatibilités prescriptives.

En complément des dispositions décrites dans la norme NF EN 206/CN et dans le *fascicule 65 du CCTG travaux*, le présent document définit les niveaux supplémentaires de prévention suivants :

- niveau de prévention **G** : bétons associé à classe d'exposition XF3 devant résister au gel pur ;
- niveau de prévention **G + S** : bétons associé à classe d'exposition XF4 devant résister au gel en présence de sels de déverglaçage. Ces bétons répondent aux spécifications du niveau de prévention G et à des exigences complémentaires liées à la résistance à l'écaillage.

Les niveaux de prévention découlent du croisement entre :

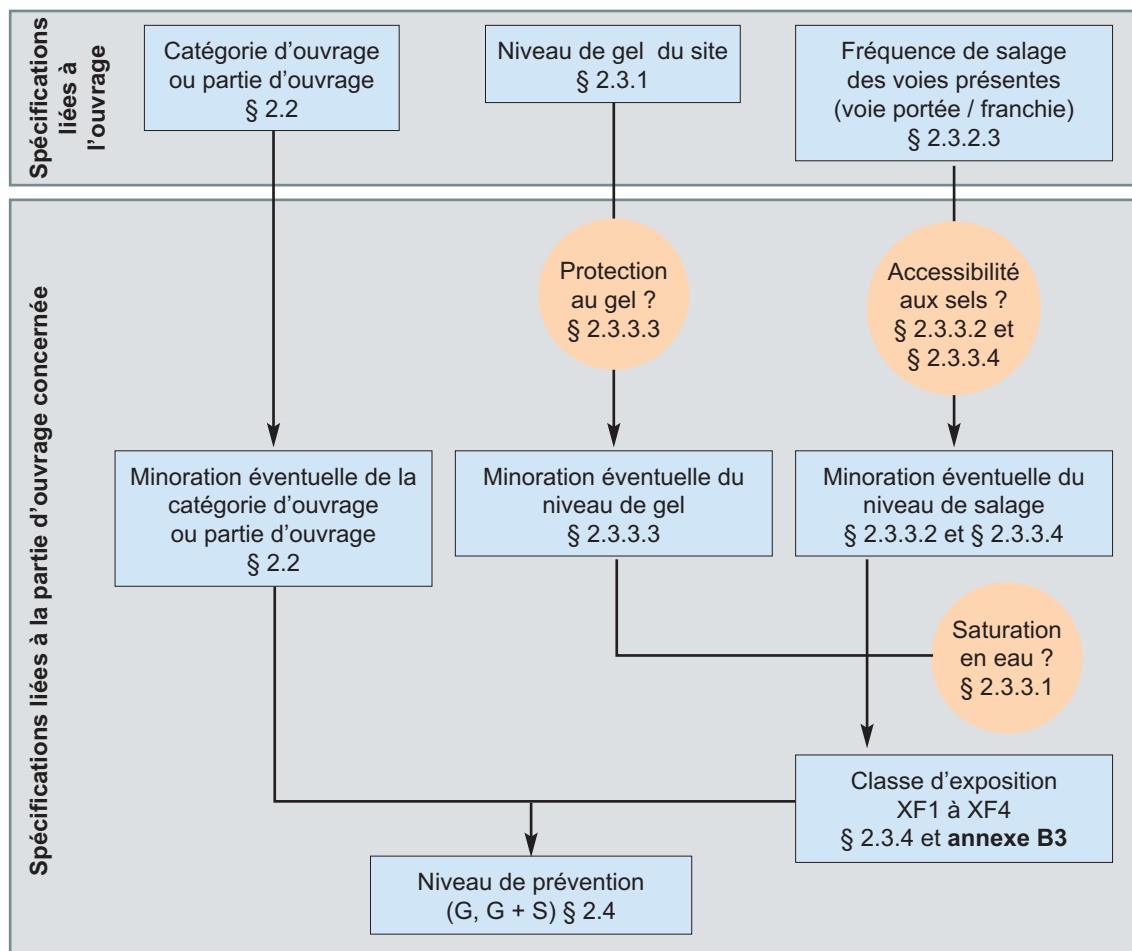
- la catégorie d'ouvrage (§ 2.2), qui représente le niveau de risque acceptable par le maître d'ouvrage pour l'ouvrage ou à la partie d'ouvrage concernée ;
- la classe d'exposition XF1 à XF4, qui traduit le niveau d'agression que subira le béton sous l'effet du gel avec ou sans sel au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Pour chaque partie d'ouvrage considérée, la classe d'exposition XF1 à XF4 découle du croisement (§ 2.3.4) entre :

- le niveau de gel,
- le niveau de salage.

Cette démarche est illustrée par la figure 5.

Figure 5. Modalités de détermination du niveau de prévention



La détermination de la catégorie d'ouvrage, des paramètres environnementaux (niveau de gel, niveau de salage, accessibilité au gel et aux sels, degré de saturation en eau), des classes d'exposition (XF1 à XF4) et des éventuels niveaux de prévention associés (G ou G + S) est de la responsabilité du maître d'ouvrage. La décomposition de l'ouvrage en parties d'ouvrage est également de sa responsabilité.

2.2 Catégories d'ouvrage

La détermination de la catégorie d'ouvrage est de la responsabilité du maître d'ouvrage. Elle est fonction notamment de la nature et de la destination de l'ouvrage, de la durée d'utilisation du projet, des conséquences des désordres sur la sécurité, et de la stratégie d'entretien au cours de sa durée d'utilisation.

L'ouvrage ou partie d'ouvrage est classé parmi trois catégories représentatives du niveau de risque d'une apparition de désordre vis-à-vis du gel que le maître d'ouvrage est prêt à accepter pour un ouvrage ou une partie d'ouvrage donné (tableau 1, page 22).

Pour les travaux de réparations, la partie d'ouvrage à réparer est à traiter selon la même démarche que dans le cas d'un ouvrage neuf.

2.3 Classes d'exposition vis-à-vis des risques de désordres dus au gel avec ou sans sels de déverglaçage

2.3.1 Définition des zones d'intensité de gel d'un site

La carte des zones de gel est issue du fascicule de documentation FD P18-326, à partir de trois niveaux de gel définis tels que :

- gel faible : pas plus de 2 jours par an ayant atteint une température inférieure à - 5 °C,
- gel sévère : plus de 10 jours par an ayant atteint une température inférieure à - 10 °C,
- gel modéré : entre gel faible et gel sévère.

Note – La carte du fascicule permet d'identifier rapidement si un département est entièrement situé en zone de gel faible ou modéré. Pour plus de précisions, il est nécessaire de se reporter à la liste des cantons du même fascicule qui indique le niveau de gel à retenir en fonction de l'altitude. Si l'ouvrage est situé sur deux cantons de niveaux de gel différents, on retiendra le niveau le plus sévère pour l'ensemble de l'ouvrage. La connaissance d'éventuels microclimats locaux doit également être prise en compte.

2.3.2 Définition des fréquence de salage d'une chaussée routière

La fréquence de salage découle en première approche des données statistiques climatiques, l'exploitant modulant cette fréquence théorique en fonction de l'enjeu local (en l'abaissant par exemple sur certains itinéraires non structurant sans enjeu particulier ou en l'augmentant en cas par exemple d'enjeu fort en matière de sécurité routière).

La démarche à appliquer est donc la suivante :

- détermination de la zone de rigueur hivernale (§ 2.3.2.1) et de la fréquence de salage théorique associée,
- détermination de la fréquence de salage prévue par l'exploitant (§ 2.3.2.2),
- détermination de la fréquence de salage à retenir pour la prévention des dégradations des bétons :
 - itinéraires structurants : prendre la fréquence de salage la plus élevée entre celles obtenues au § 2.3.2.1 et au § 2.3.2.2,
 - itinéraires non structurants : prendre la fréquence de salage découlant du § 2.3.2.2.

Tableau 1
Catégories d'ouvrage en fonction du risque de désordres dus au gel avec ou sans sels

Catégories d'ouvrage ou de parties d'ouvrage	Niveaux de risque	Exemples d'ouvrage ou de parties d'ouvrage
Catégorie A	Faible ou acceptable	<p>Ouvrages en béton de classe de résistance inférieure ou égale à C25/30. Éléments non porteurs situés à l'intérieur de bâtiments. Éléments aisément remplaçables. Ouvrages provisoires. Ouvrages divers de voirie (bordures, caniveaux)¹. Ouvrages d'assainissement des plateformes routières¹. barrières de sécurité en béton¹. La plupart des produits préfabriqués, structurels² ou non, correspondant à une durée d'utilisation de projet inférieure ou égale à 50 ans. La plupart des bâtiments correspondant à une durée d'utilisation de projet inférieure ou égale à 50 ans.</p>
Catégorie B	Peu tolérable	<p>La plupart des produits préfabriqués structurels² et des bâtiments, pour lesquels le maître d'ouvrage juge le risque de dégradations dues au gel avec ou sans sels peu tolérable. Ouvrages ou parties d'ouvrage de génie civil pour lesquels le maître d'ouvrage juge le risque de dégradations dues au gel avec ou sans sels peu tolérable. Massifs d'ancrages de portiques, éoliennes, potences et hauts mâts, candélabres.</p>
Catégorie C	Inacceptable ou quasi inacceptable	<p>La plupart des produits préfabriqués structurels², et des bâtiments pour lesquels le maître d'ouvrage juge le risque de dégradations dues au gel avec ou sans sels inacceptable ou quasi-inacceptable. Ouvrages ou parties d'ouvrages de génie civil pour lesquels le maître d'ouvrage juge le risque de dégradations dues au gel avec ou sans sels inacceptable ou quasi-inacceptable. Ponts³ et passerelles. Réservoirs de station de traitement des eaux usées. Tunnels. Barrages. Bâtiments réacteurs de centrale nucléaire et aérorefrigérants. Monuments ou bâtiments de prestige. Installations pour remontées mécaniques.</p>

¹ Pour ces types de parties d'ouvrage, en cas de forte exposition, la prise en compte des coûts d'entretien sur le long terme peut conduire à privilégier un classement en catégorie B voire C, en particulier si des solutions en béton G / G + S sont disponibles localement.

² Les éléments préfabriqués structurels sont classés dans la catégorie de l'ouvrage auquel ils seront intégrés.

³ Certaines parties d'ouvrage, comme les dalles de transition de pont, peuvent être classées en catégorie B.

Note - Ces catégories d'ouvrage sont globalement très proches de celles définies pour la prévention de la réaction sulfatique interne (RSI) et de la réaction alcali-granulat (RAG). Cependant, certaines particularités propres aux pathologies dues au gel avec ou sans sels peuvent conduire à classer certaines parties d'ouvrages de manière très différentes. Par exemple, il est d'usage de considérer comme inacceptable (du point de vue de la sécurité des usagers) le risque de chutes d'éclats de béton de corniches par écaillage au-dessus d'une voie circulée, ce qui revient à utiliser la catégorie C telle que définie ci-dessus (au lieu de la catégorie II généralement retenue dans ce cas pour la RAG et la RSI). Le choix a donc été fait de créer une nouvelle nomenclature (A à C, au lieu de I à III) pour éviter toute confusion au niveau des marchés.

La fréquence de salage est à définir pour chaque voie de circulation. Les différentes voies peuvent présenter une exigence de niveau de service distinct et donc un niveau de salage différent.

Note – Dans le cas d'un ouvrage d'art, on distinguera la voie franchie et la voie portée.

2.3.2.1 Classement des zones de rigueurs hivernales Hi

L'annexe B2 présente un classement territorial de rigueurs hivernales Hi. Cette carte des Hi (H1 à H5) a pour objet d'évaluer les conséquences des situations météorologiques hivernales exprimées en termes de dégradations des conditions de circulation. On peut ainsi en déduire une fréquence de salage théorique basée sur les données climatiques (tableau 2).

Tableau 2

Définition de la fréquence de salage à partir des zones de rigueur hivernale Hi

Zones de rigueur hivernale Hi	Nombre correspondant de jours de salage	Fréquences de salage
H1	$n < 10$	Salage peu fréquent
H2	$10 \leq n < 30$	Salage fréquent
H3, H4 et H5	$30 \leq n$	Salage très fréquent

Note - Les jours de salage mentionnés dans le tableau 2 sont estimés à partir d'indicateurs statistiques relatifs aux conditions climatiques : nombre de jours moyen annuel avec chute de neige, apparition de verglas avec ou sans précipitations (annexe B2).

2.3.2.2 Politique d'exploitation pour la viabilité hivernale

Il est indispensable de consulter le futur gestionnaire de l'ouvrage pour connaître la politique d'exploitation de viabilité hivernale qui sera appliquée sur l'ouvrage.

Note – Les exploitants des réseaux autoroutiers et national établissent des dossiers d'organisation de viabilité hivernale (DOVH). Il convient de se référer à ce dossier pour connaître le nombre de jours de salage appliqué par l'exploitant. Cette consultation est à réaliser pour chacune des voies existantes pour le projet (par exemple, voie portée et voie franchie pour un pont routier).

La fréquence de salage peut être déterminée par le nombre de jours de salage comptabilisé par année moyenné sur 10 ans tel que reporté dans le tableau 2.

2.3.3 Notion d'exposition d'une partie d'ouvrage

Lors de la détermination de la classe d'exposition, il est nécessaire d'évaluer le niveau d'exposition de chaque partie d'ouvrage. L'exposition est fonction du degré de saturation en eau, de l'accessibilité des sels et de la possible protection au gel de la partie d'ouvrage considérée.

Note – Des parties d'ouvrages peuvent être protégées de l'exposition générale du site. Certains exemples sont évidents, comme la protection de l'exposition aux sels d'un hourdis supérieur de tablier par son étanchéité. D'autres sont plus complexes à définir, en particulier ceux liés à la possibilité de saturation en eau de la pièce (surfaces horizontales exposées aux intempéries).

Le béton doit assurer par lui-même sa protection vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels.

Note – De manière générale, les produits de protection de surfaces ne présentent pas une durée d'utilisation garantie équivalente à celle de la durée d'utilisation du projet.

Le tableau 31 de l'annexe B3 présente une aide à la détermination de la classe d'exposition d'une partie d'ouvrage en fonction des conditions de site (salage, gel et saturation en eau des surfaces de béton), dans le cas particulier des ouvrages d'art en béton.

2.3.3.1 Degré de saturation en eau

Le niveau d'exposition à l'eau de la partie d'ouvrage considérée influe fortement sur :

- le degré de saturation en eau du béton et donc le risque de détérioration au gel interne :

- « niveau fort » pour les surfaces horizontales, sur lesquelles l'eau est susceptible de stagner,

Note – Cette définition exclut donc de fait les intrados de tablier d'ouvrages d'art, par exemple.

- « niveau faible » pour les surfaces verticales,

- la possibilité de saturation en eau en présence de sels de déverglaçage et par conséquent le risque de dégradation par écaillage.

Note - La saturation en eau en présence de sels de déverglaçage est généralement prise en compte au travers d'une mention telle que « partie d'ouvrage très exposée au risque d'écaillage » (cf. § 2.3.3.4). Cette notion est distincte de celle d'éléments en béton directement soumis aux sels de déverglaçage de la norme NF EN 1992-2, qui concerne les risques de corrosion des armatures.

2.3.3.2 Accessibilité aux sels de déverglaçage

Les ouvrages sont exposés aux sels lorsqu'il y a présence d'une chaussée routière sur laquelle on applique un salage pour assurer la viabilité hivernale.

De manière générale, l'exposition d'une partie d'ouvrage se détermine en prenant en compte la distance qui la sépare de la chaussée salée la plus proche.

En cohérence avec l'Annexe nationale de la norme NF EN 1992-2, qui traite en particulier de la détermination des valeurs d'enrobage des armatures, les parties extérieures d'ouvrages situées à plus de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée ne sont pas réputées exposées aux projections de sels de déverglaçage.

Toutefois, lorsque des ruissellements d'eau sont susceptibles de transporter les sels de déverglaçage, les parties d'ouvrage soumises à ces ruissellements sont considérées comme étant exposées au même niveau de salage que celles directement impactées par la chaussée routière source du salage.

Note - Le tableau 31 de l'annexe B3 présente une aide à la détermination de la classe d'exposition d'une partie d'ouvrage en fonction des conditions de site (salage, gel et saturation en eau des surfaces de béton), dans le cas particulier des ouvrages d'art en béton.

Note - Dans le cas des tunnels, il est d'usage de considérer que les 200 premiers mètres sont soumis aux mêmes conditions de salage que celles à laquelle sont soumises les voies à l'extérieur du tunnel.

2.3.3.3 Possible protection au gel

Les parties d'ouvrages sont soumises au niveau de gel déterminé en fonction des conditions de site (§ 2.3.1), à l'exception des parties d'ouvrage enterrées situées sous la profondeur de mise hors-gel. Cette profondeur peut être déterminée à l'aide de l'article O.4 l'annexe O de la norme NF P 94-261, avec la formule de calcul modifiée par l'amendement A1 de février 2017.

Note – La profondeur est à adapter pour les DOM-TOM, non couverts par la norme NF P 94-261.

2.3.3.4 Parties d'ouvrage très exposées au risque d'écaillage

Les parties d'ouvrage réputées très exposées au risque d'écaillage sont celles constituées majoritairement de surfaces horizontales et soumises aux projections directes de sels de déverglaçage. À titre d'exemple pour les ouvrages d'art, sont généralement concernées les parties d'ouvrages suivantes : corniches, solins d'ancrage des joints de chaussée, longrines d'ancrages des dispositifs de retenue.

Note - Cette notion est différente de celle de partie d'ouvrage très exposée au sens de la norme NF EN 1992-2, qui ne vise que le risque de corrosion des armatures (parties d'ouvrage situées à moins de 6 mètres de la voie salée).

2.3.4 Classe d'exposition des parties d'ouvrages XF1 à XF4

La détermination de la classe d'exposition pour un ouvrage ou une partie d'ouvrage est basé sur le croisement de l'intensité de gel et de la fréquence de salage (tableau 3).

Tableau 3. Choix de la classe d'exposition XF1 à XF4 pour un ouvrage ou une partie d'ouvrage en fonction du niveau de gel et de l'exposition aux sels

Expositions (parties d'ouvrages)		Conditions de site					
Exposition aux sels	Saturation en eau	Gel faible ou modéré			Gel sévère		
		Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent	Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent
Oui	Forte	XF1	XF2	XF4	XF3	XF4	XF4
	Faible	XF1	XF2	XF2	XF3	XF4	XF4
Non	Forte	XF1	XF1	XF1	XF3	XF3	XF3
	Faible	XF1	XF1	XF1	XF3	XF3	XF3

Note - Cette méthode de choix de la classe d'exposition est cohérente avec la norme NF EN 206/CN, la norme NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale et le fascicule 65 du CCTG travaux.

Note - Afin d'aider le prescripteur, une mise à jour des tableaux d'aide à la prescription des classes d'exposition de l'École française du béton est proposée en annexe B3, dans le cas particulier des ouvrages d'art en béton.

2.4 Niveaux de prévention vis-à-vis de la durabilité aux effets du gel avec ou sans sels

Le tableau 4 permet de déterminer le niveau de prévention vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels d'une partie d'ouvrage. La détermination du niveau de prévention se fait en fonction de la catégorie d'ouvrage et de la classe d'exposition XF1 à XF4 à laquelle est soumise la partie d'ouvrage considérée.

Les prescriptions associées à ce classement pour la partie d'ouvrage concernée sont définies comme suit.

Tableau 4

Niveau de prévention vis-à-vis de la durabilité aux effets du gel avec ou sans sels en fonction de la catégorie d'ouvrage (selon la section 2.2 de ce guide) et de la classe d'exposition

Catégories d'ouvrage	Classes d'exposition			
	XF1	XF2	XF3	XF4
A	À traiter selon les normes en vigueur (par exemple : NF EN 206/CN, NF EN 14487-1, NF EN 13369, normes de produits préfabriqués)			
B	À traiter selon les prescriptions du fascicule 65 du CCTG travaux (article 8 et tableau 8B)			
C	À traiter selon les prescriptions du fascicule 65 du CCTG travaux (article 8 et tableau 8B)		G	G + S

Avec :

- niveau de prévention **G** : prescriptions selon les spécifications de résistance au gel des présentes recommandations,
- niveau de prévention **G + S** : prescriptions selon les spécifications de résistance au gel et aux sels des présentes recommandations.

Les niveaux de prévention **G** et **G + S** sont conformes aux exigences du fascicule 65 du CCTG travaux et de la norme NF EN 206/CN. Ils introduisent des exigences complémentaires par rapport à ces textes, décrites dans les présentes recommandations.

Chapitre 3

Démarche d'assurance qualité

3.1 Management de la qualité

Le management de la qualité a pour objectif l'obtention et le maintien des performances requises par la mise en place d'une démarche méthodologique structurée sur les plans de l'organisation de la réalisation, de la maîtrise des risques, du contrôle de l'exécution, de la correction éventuelle des défauts et de la maîtrise des documents et des enregistrements.

Conformément à la norme d'exécution des structures en béton NF EN 13670/CN, les exigences relatives au management de la qualité doivent être spécifiées par le maître d'ouvrage.

Les niveaux d'exigences formulés dans ces recommandations sont adaptés aux ouvrages relevant du fascicule 65 du CCTG travaux qui exige un niveau de classe d'exécution maximale correspondant à la classe 3 de la norme NF EN 13670/CN.

Le rôle des différents acteurs peut être schématisé par la figure 6.

Figure 6
Rôle des principaux acteurs du point de vue de la durabilité au gel avec ou sans sels

Préparation
<p>Le maître d'ouvrage définit :</p> <ul style="list-style-type: none">- les parties d'ouvrage,- la catégorie d'ouvrage,- le niveau de gel du site,- le niveau de salage des voies présentes sur le projet,- les classes d'exposition XF1 à XF4 de chaque partie d'ouvrage,- le niveau de prévention éventuel G ou G + S de chaque partie d'ouvrage. <p>Le maître d'œuvre élabore :</p> <ul style="list-style-type: none">- la rédaction des pièces techniques du marché.
Études et agréments
<p>L'entreprise propose :</p> <ul style="list-style-type: none">- le plan qualité,- les centrales à béton (principale et de secours le cas échéant), usines de préfabrication,- la formulation des bétons (*),- le dossier d'étude ou références probantes (*). <p>Le maître d'œuvre (après avis du contrôle extérieur) :</p> <p>lève le point d'arrêt suivant (non exhaustif) :</p> <ul style="list-style-type: none">- la spécification des bétons. <p>valide les points suivants (non exhaustif) :</p> <ul style="list-style-type: none">- l'acceptation des centrales et usines de préfabrication,- l'épreuve d'étude des bétons. <p>valide les dispositions prévues au plan qualité.</p>

Convenances

L'entreprise :

- propose au maître d'œuvre le programme de convenance,
- organise les épreuves de convenance,
- rédige le rapport de l'épreuve de convenance (*).

Le maître d'œuvre :

lève le point d'arrêt « épreuves de convenance » après avis du contrôle extérieur qui :

- donne un avis sur le programme de convenance,
- assiste aux épreuves de convenance,
- donne un avis sur le résultat des épreuves de convenance.

Phase chantier

L'entreprise :

- propose le plan qualité, mise en œuvre, contrôles,
- organise le contrôle intérieur :
 - contrôle à réception,
 - essais sur béton (*).

Le maître d'œuvre :

- valide les dispositions prévues au plan qualité,
- lève le point d'arrêt suivant (non exhaustif) :
 - autorisation de bétonnage.

Après avis du contrôle extérieur sur :

- l'organisation et les résultats du contrôle intérieur,
- les dispositions du plan qualité.

(*) L'entreprise doit se faire assister par un laboratoire spécialisé :

- pour la réalisation des essais de durabilité : laboratoire accrédité Cofrac ou équivalent pour les essais concernés (§ 3.2.6),
- pour la rédaction des rapports des épreuves d'étude et de convenance : laboratoire ayant une expérience préalable de suivi de chantier similaire.

3.2 Les acteurs

3.2.1 Le maître d'ouvrage

Il s'agit de la personne physique ou morale pour laquelle l'ouvrage est construit. Le maître d'ouvrage est le responsable principal de l'ouvrage. Il définit les objectifs de l'opération et les besoins qu'elle doit satisfaire ainsi que les contraintes et exigences relatives à la réalisation et à l'utilisation de l'ouvrage

3.2.2 Le maître d'œuvre

3.2.2.1 Définition

Il s'agit de la personne physique ou morale, publique ou privée, qui, en raison de sa compétence technique, est chargée par le maître d'ouvrage ou son mandataire d'assurer la conformité architecturale, technique et économique de la réalisation du projet objet du marché, de diriger l'exécution des marchés de travaux, de lui proposer leur règlement et de l'assister lors des opérations de réception ainsi que pendant la période de garantie de parfait achèvement.

3.2.2.2 Points d'arrêt et de validation

Il s'agit des étapes au-delà desquelles une activité ne peut se poursuivre sans un accord formel du maître d'œuvre, formalisé par un document d'enregistrement.

Liste de points d'arrêt indicative et non exhaustive recommandée pour le maître d'œuvre :

- épreuve de convenance des bétons y compris éventuellement élément témoin,
- autorisation de bétonnage.

Les points suivants font l'objet d'une validation du maître d'œuvre (liste indicative et non exhaustive) :

- spécifications des bétons,
- épreuve d'étude des bétons,
- acceptation des centrales,
- acceptation des usines de préfabrication.

3.2.2.3 Contrôle extérieur

Les opérations de contrôle extérieur regroupent l'ensemble des opérations de contrôle, de vérification et d'essais, que le maître d'œuvre exécute ou fait exécuter par un organisme indépendant du titulaire, pour le compte du maître d'ouvrage.

Le recours à un organisme réalisant les missions de contrôle extérieur est obligatoire pour les aspects liés à la durabilité des bétons au gel avec ou sans sels. Cet organisme doit avoir une compétence reconnue dans le domaine de la durabilité au gel avec ou sans sels.

Les opérations de contrôle extérieur visent à contrôler la conformité aux stipulations du marché et aux exigences réglementaires.

D'un point de vue général, elles consistent à :

- vérifier que le titulaire du marché s'est effectivement organisé pour respecter les exigences du contrat (ce qui inclut l'acceptation du plan qualité et l'agrément des constituants),
- surveiller l'application et l'efficacité du contrôle intérieur du titulaire,
- contrôler directement les étapes clefs de la construction de manière à permettre la levée des points d'arrêt par le maître d'œuvre,
- effectuer les contrôles supplémentaires qu'il estime nécessaires.

Du point de vue de la durabilité au gel avec ou sans sels, les missions réalisées au titre du contrôle extérieur comprennent *a minima* :

- la rédaction des avis sur :
 - l'agrément des centrales à béton et des usines de préfabrication,
 - les formulations de béton,
 - les références, les résultats des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle.
- le suivi des épreuves de convenance,
- la vérification de l'organisation et des résultats du contrôle interne (béton frais, béton durci et durabilité au gel avec ou sans sels).

Il est recommandé que le laboratoire du contrôle extérieur procède à la réalisation d'essais de durabilité au gel ou au gel et sels en cours de chantier. Dans ce cas, il est utile de procéder à des essais croisés avec le contrôle intérieur lors des épreuves de convenance. Si lors de ces essais croisés de convenance, un écart est constaté entre le laboratoire du contrôle intérieur et celui du contrôle extérieur, une enquête sera réalisée pour identifier et réduire au maximum les sources d'erreur.

La nature et la fréquence des actions de ce contrôle extérieur sont modulées en fonction du niveau de confiance résultant du plan qualité et de l'évaluation des risques vis-à-vis de l'obtention des exigences spécifiées.

Le jugement qu'implique une opération de contrôle ne peut en aucun cas être demandé au même organisme pour le contrôle intérieur et pour le contrôle extérieur relatifs à une même tâche.

3.2.3 L'entreprise

3.2.3.1 Définition

Il s'agit de la personne physique ou morale titulaire du marché de travaux.

3.2.3.2 L'utilisateur

Il s'agit de la personne physique ou morale qui commande et utilise le béton frais pour l'exécution d'un ouvrage ou d'un élément. L'utilisateur est responsable de la mise en œuvre du béton.

3.2.3.3 Contrôle intérieur

Les opérations de contrôle intérieur regroupent l'ensemble des contrôles exercés par le titulaire ou pour son compte, sur ses propres actions, ou celles de ses sous-traitants.

Les opérations de contrôle intérieur peuvent, selon le contexte de l'opération, être constituées par :

- le contrôle interne,
- le contrôle interne complété par un contrôle externe.

Le contrôle interne est constitué par l'ensemble des opérations de surveillance, de vérification et d'essais exercés sous l'autorité du ou des responsables de la fabrication du béton ou de l'exécution des travaux, dans les conditions définies par le plan qualité.

Le contrôle externe correspond à l'ensemble des opérations de surveillance, de vérification et d'essais exercées sous l'autorité ou à la demande d'un responsable indépendant de la chaîne de production ou du chantier d'exécution, mandaté par le titulaire.

Les actions du contrôle intérieur doivent permettre une réaction aussi rapide et efficace que possible sur les processus de fabrication et d'exécution.

Il appartient au titulaire de définir dans son plan qualité, et en particulier dans ses procédures d'exécution, l'organisation et les missions de son contrôle intérieur.

Le contrôle intérieur s'exerce de façon permanente et à tous les échelons de l'exécution sous l'autorité de la personne désignée par le titulaire.

Le laboratoire de contrôle intérieur procède à la réalisation des essais de durabilité au gel ou au gel et sel en épreuve d'étude, de convenance et en cours de chantier.

3.2.4 Le prescripteur

Il s'agit de la personne physique ou morale qui établit la spécification du béton frais et durci.

Note - Selon les modalités du marché, le prescripteur peut être l'un ou plusieurs des intervenants suivants : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entrepreneur ou préfabricant.

3.2.5 Le producteur

Le producteur est la personne physique ou morale produisant le béton frais. Le producteur est responsable du contrôle de production du béton.

3.2.6 Les laboratoires d'essai

Les laboratoires réalisant les essais de gel interne, d'écaillage et de détermination du facteur d'espacement doivent être accrédités Cofrac ou équivalent sur ces essais.

3.3 Les épreuves d'étude, de convenance et de contrôle

La classe d'exécution au sens de la norme NF EN 13670/CN étant 3 pour ce type d'ouvrage, la vérification de la conformité aux spécifications du marché passe par l'organisation d'épreuves d'études, de convenances et de contrôles.

Note - La classe d'exécution 3 correspond aux prescriptions du fascicule 65 du CCTG travaux.

Les épreuves sont confiées au titulaire du marché et leurs résultats sont soumis à l'approbation du maître d'œuvre.

Les épreuves d'étude concernent le béton avant sa mise en œuvre effective sur le chantier pour s'assurer que ses caractéristiques répondent aux exigences spécifiées.

Les épreuves de convenance concernent la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton dans les conditions spécifiques à l'opération. Elles servent à s'assurer a priori que ce processus permet effectivement d'obtenir un béton qui réponde aux exigences spécifiées.

Les épreuves de contrôle, processus concernant la production effective d'un béton et permettant de s'assurer que ses caractéristiques répondent aux exigences spécifiées, sont effectuées par le contrôle intérieur. La poursuite de l'exécution de l'ouvrage est assujettie à l'obtention de résultats conformes.

Chapitre 4

Spécifications des constituants

4.1 Granulats

4.1.1 Granulats courants

Ils répondent aux exigences de la norme NF EN 12620 complétée par la norme NF P 18-545 et par les exigences complémentaires décrites ci-dessous.

Les caractéristiques de chaque classe granulaire doivent correspondre à la catégorie A de l'article 10 de la norme NF P 18-545, sauf l'aplatissement des gravillons et la teneur en fines des sables qui peuvent être de catégorie B.

Si la teneur en fines des sables est de catégorie B, le fournisseur déclare une valeur moyenne de teneur en fines à respecter sur toute la durée du chantier, avec une étendue $e = 6 (\pm 3 \text{ points de } \%)$.

Pour les chantiers de plus de 6 mois, le fournisseur de sable déclare une valeur moyenne de module de finesse à respecter sur toute la durée du chantier, avec une étendue de $0,6 (\pm 0,3)$.

Note – L'étendue de $0,6 (\pm 0,3)$ correspond à la catégorie A du module de finesse. Pour les chantiers de longue durée, la moyenne du module de finesse pourrait dériver dans le temps tout en restant conforme à la catégorie A. La durée de 6 mois permet de garantir le respect de la régularité de la valeur sur une durée supérieure à la durée de la période d'engagement présente sur les fiches techniques produits des granulats.

Les gravillons doivent être de catégorie F1, ce qui correspond à une perte de masse $\leq 1 \%$ lors de l'essai de gélivité des granulats selon la norme NF EN 1367-1. Les granulats présentant une absorption WA24 $\leq 1 \%$ selon la norme NF EN 1097-6 sont réputés satisfaire à cette exigence.

La prise en compte des équivalences basées sur les valeurs de l'essai Los Angeles n'est pas autorisée.

Note – Ces prescriptions sur les granulats découlent de la prise en compte du contexte d'utilisation (fortes contraintes hivernales) et de la nécessité d'avoir des granulats permettant de passer avec succès les essais de performance sur béton.

Note – Il est possible de réaliser l'essai de gel sur granulats avec sels selon la norme NF EN 1367-6 pour vérifier leur résistance au gel avec sels, notamment en cas de réalisation de bétons avec granulats apparents.

4.1.2 Autres granulats

Les granulats légers répondant aux exigences de la norme NF EN 13055-1 ne sont pas couverts par les présentes recommandations.

Les granulats récupérés ou recyclés ne sont pas autorisés, dans l'état actuel des connaissances.

4.2 Ciments

Les ciments répondent aux exigences de la norme NF EN 197-1 et bénéficient de la marque NF – liants hydrauliques ou équivalent, y compris pour les prescriptions complémentaires.

Note – Il n'est pas utile de définir au marché une classe de résistance pour le ciment dans la mesure où la résistance en compression est vérifiée sur béton au niveau des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle. Pour mémoire, les classes de résistance habituellement utilisées pour les ciments sont 42,5 N - 42,5 R - 52,5 N - 52,5 R.

Dans le cas des bétons d'ingénierie, selon les prescriptions de la norme NF EN 206/CN, le mélange de deux ciments est autorisé.

En cas d'utilisation de sels de déverglaçage (bétons G + S), il est nécessaire d'utiliser un ciment répondant aux exigences par la norme NF P 15-317 (PM) ou un ciment résistant aux sulfates tel que défini ci-après. S'il est prévu de n'utiliser que des sels de déverglaçage répondant aux exigences des classes A ou B de la norme NF P 98-180, ou répondant aux exigences de la norme XP P98-181, pendant la durée d'utilisation de l'ouvrage, il est possible de déroger à cette exigence.

Note – Pour les ouvrages ayant une durée d'utilisation de projet de 100 ans, il est préférable de supposer que la composition des sels de déverglaçage ne peut pas être connue sur cette durée et donc de ne pas appliquer cette possibilité.

Pour les besoins des présentes recommandations, sont réputés résistant aux sulfates apportés par les sels de déverglaçage les ciments suivants.

Les ciments SR conformes à la norme NF EN 197-1 et, dans le cas des CEM I, aux spécifications complémentaires suivantes de la norme NF EN 206/CN :

- teneur en $SO_3 \leq 3,5 \%$ pour les ciments SR0 ou SR3 ;
- teneur en $SO_3 \leq 2,5 \%$ pour les ciments SR5 ;
- teneurs en C_3A et C_4AF du *clinker* telles que la condition suivante : $(C_4AF) + 2 (C_3A) \leq 20 \%$ soit satisfaite.

Note – Les ciments résistant aux sulfates (SR) au sens de la norme NF EN 197-1 et répondant aux exigences complémentaires de la marque NF – liants hydrauliques répondent à cette exigence.

Les ciments conformes à la norme NF P 15-319 (ES).

Note – En cas d'utilisation d'additions, la résistance aux sulfates pourra être évaluée en considérant le liant total sur la base des dispositions définies dans le FD P18-011.

Tableau 5
Ciments autorisés pour les bétons G et G + S

Caractéristiques du béton	Spécifications, bétons G ou G + S
Formulations avec un adjuvant entraîneur d'air	CEM I ou CEM II/A ou B sans cendres volantes ou CEM IV sans cendres volantes
Formulations sans adjuvant entraîneur d'air	CEM I ou CEM II / A ou B ou CEM IV

4.3 Additions

Les additions répondent aux exigences de leurs normes respectives :

- cendres volantes, norme NF EN 450-1,
- fumées de silice, norme NF EN 13263-1,
- laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau, norme NF EN 15167-1,
- des métakaolins de type A, norme NF P 18-513,
- additions calcaires de catégorie A ou B, norme NF P 18-508,
- additions siliceuses de minéralogie Qz, norme NF P 18-509,
- pigments, norme NF EN 12878 (catégorie B si béton armé).

Les additions admises en substitution partielle du ciment sont celles autorisées par la norme NF EN 206/CN.

Ces mêmes additions peuvent aussi être utilisées comme correcteur granulométrique si elles respectent les normes qui les concernent.

Tableau 6
Additions autorisées pour les bétons G et G + S

Caractéristiques	Spécifications (type et classe)	
	Béton G	Béton G + S
Formulations avec un adjuvant entraîneur d'air	Additions autorisées par le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG travaux sauf cendres volantes	Additions autorisées par le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG travaux sauf cendres volantes
Formulations sans adjuvant entraîneur d'air	Additions autorisées par le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG travaux	Additions autorisées par le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG travaux

La teneur en laitier du liant total (cumul de la quantité de laitier dans le ciment et de l'apport en tant qu'addition et de correcteur granulométrique) ne doit pas excéder 35 % en masse.

Dans le cas des bétons G + S, du point de vue de la résistance aux sulfates, le liant total répond aux exigences du fascicule de documentation FD P18-011.

Note – Les additions autorisées comme constituants principaux dans la composition des ciments du tableau 5 ont été autorisées par cohérence dans le tableau 6.

Note – Pour les bétons G + S, la liste des additions autorisées a été élargie par rapport aux recommandations de 2003 pour prendre en compte le fait que la résistance à l'écaillage peut être validée sur la base d'un essai de performance (selon la norme XP P 18 420).

Note – La restriction relative à l'emploi de cendres volantes provient de l'incompatibilité entre les teneurs en imbrulés de certaines cendres et l'utilisation d'adjuvants entraîneurs d'air. Des dispositions spécifiques relatives à l'utilisation de cendres volantes avec un adjuvant entraîneur d'air sont définies en annexe A3.

Note – Des dispositions complémentaires sont définies en annexe A2 pour les teneurs en laitier de hauts fourneaux supérieures à 35 %.

Note – L'autorisation d'emploi des métakaolins a été introduite sur la base des études listées en bibliographie.

4.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage répond aux exigences de la norme NF EN 1008. L'utilisation d'eau chargée (densité > 1,01 t/m³) est interdite en cas de formulation de bétons utilisant des adjuvants entraîneurs d'air.

4.5 Adjuvants

Les adjuvants pour bétons répondent aux exigences de la norme NF EN 934-2 + A1 et bénéficient de la marque NF – adjuvants ou équivalent.

4.6 Fibres

Les fibres répondent aux exigences des normes suivantes :

- NF EN 14889-1, pour les fibres en acier,
- NF EN 14899-2, pour les fibres polymères.

Note – L'attention est attirée sur le fait que certaines fibres polymère peuvent perturber la régularité de l'entraînement de l'air.

4.7 Ajouts

Les ajouts prévus par la norme NF EN 206/CN sont autorisés.

En particulier, sont autorisés comme ajout :

- les fibres de verre,
- les agents de viscosité répondant aux exigences de la norme NF EN 934-2.

Chapitre 5

Exigences relatives à la formulation des bétons

5.1 Bétons coulés ou extrudés

La composition doit répondre aux exigences du tableau 7.

Tableau 7
Exigences relatives aux bétons G et G + S

Caractéristiques	Spécifications	
	Béton G	Béton G + S
Rapport E_{eff} / Liant eq	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de résistance à la compression minimale à 28 jours	C30/37	C35/45 ¹
Dosage minimal en liant équivalent		
Bétons coulés	385 kg/m ³ pour un D20 ²⁻³	
Bétons extrudés	330 kg/m ³ pour un D20 ²	

(1) : pour les bétons non armés ou faiblement armés, il est possible de réduire la classe de résistance à C30/37 en utilisant l'essai de gel interne adapté (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) et l'essai de performance d'écaillage (norme XP P 18-420) et les seuils correspondants (§ 7.4).

(2) : cette valeur est définie pour $D_{max} = 20$ mm. La quantité de liant équivalent à ajouter (+) ou à déduire (-) en pourcentage de la valeur indiquée, en fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat, exprimée en millimètres est pour $D \leq 12,5$: + 10 % ; $D = 14$: + 7,5 % ; $D = 16$: + 5 % ; $D = 22,4$: - 2,5 % ; $D \geq 31,5$: - 10 %.

(3) : il est possible de réduire le dosage minimal en liant équivalent de la manière suivante :

- à 350 kg/m³ pour le niveau de prévention G en justifiant la performance avec un essai de gel interne adapté (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) et les seuils correspondants (§ 7.4).

- à 370 kg/m³ pour le niveau de prévention G + S en utilisant l'essai de gel interne adapté (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) et l'essai de performance d'écaillage (norme XP P 18-420) et les seuils correspondants (§ 7.4).

La prise en compte du liant équivalent au sens de la norme NF EN 206/CN est autorisée pour les bétons G et G + S avec des ciments CEM I et CEM II/A. Les coefficients k à retenir pour les additions sont ceux définis dans la norme NF EN 206/CN.

Les taux de substitution maximum autorisés pour la prise en compte des additions dans le calcul du liant équivalent sont définis dans le tableau 8b *fascicule 65 du CCTG travaux*.

Les formulations de bétons d'ingénierie au sens de la norme NF EN 206/CN sont autorisées, en respectant les spécifications du § 4.3 relatives aux laitiers de hauts fourneaux.

5.2 Utilisation d'adjuvants entraîneurs d'air

Les règles d'utilisation des adjuvants entraîneurs d'air sont définies dans le tableau 8.

Tableau 8

Règles d'utilisation des adjuvants entraîneur d'air

Classes de résistance à la compression à 28 jours	< C50/60 ¹	≥ C50/60 ²
Modalités de formulation	Utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air	Utilisation ou non d'un adjuvant entraîneur d'air selon expérience du producteur de béton ³

(1) : en dessous de 50 MPa, la résistance au gel pour les bétons G ou G + S ne peut généralement pas être garantie sans modification du réseau poreux (cf. § 1.4.1).

(2) : au-delà de 50 MPa, il peut être difficile de garantir l'obtention des résistances en compression en présence d'air entraîné. En l'état actuel des connaissances, on peut distinguer deux classes de bétons vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels en fonction du rapport $E_{eff} / \text{Liant eq}$ (cf. § 1.4.1) :

- Classe 1 : $E_{eff} / \text{ciment} \geq 0,32$

- Classe 2 : $E_{eff} / \text{ciment} < 0,32$

Les bétons de classe 1 ont un comportement au gel difficilement prévisible et il est nécessaire de les traiter au cas par cas, notamment pour décider d'incorporer ou non un adjuvant entraîneur d'air.

Les bétons de la classe 2 sont des bétons caractérisés par un rapport $E_{eff} / \text{Liant eq}$ très bas, l'absence d'un agent entraîneur d'air et une résistance mécanique généralement supérieure ou égale à 80 MPa d'où une compacité très élevée. De ce fait, ils contiennent une très faible quantité d'eau libre susceptible de se transformer en glace. Leur forte compacité réduit considérablement les risques d'absorption d'eau venant de l'extérieur. Dans ces conditions, ces bétons résistent généralement aux cycles gel/dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

(3) : par « expérience du producteur », il faut comprendre la connaissance qu'a le producteur des matériaux qu'il utilise pour formuler ses bétons. Le choix de mettre ou non de l'air est laissé à sa libre appréciation, la validation de la pertinence de ce choix étant justifiée sur la base d'essais lors des épreuves d'étude et de convenance.

Chapitre 6

Méthodes d'essais

Les dispositions décrites dans les annexes nationales informatives des normes d'essais citées dans ce chapitre sont d'application obligatoire.

6.1 Représentativité des prélèvements

Les prélèvements sur béton frais doivent être réalisés selon la norme NF EN 12350-1. Ils doivent être réalisés après incorporation de tous les constituants prévus par la formulation (eau, pigment, fibres, fluidifiants, etc.).

Les prélèvements en sortie de cuve agitatrice doivent être réalisés après un brassage énergétique de 60 secondes avec une vitesse au moins égale à 12 tours par minute.

En cas de mise en œuvre d'un traitement thermique du béton, les essais de gel interne (bétons G et G + S) et d'écaillage (béton G + S) devront être effectués sur des échantillons ayant subi le même traitement thermique.

Cas des bétons mis en place par pompage.

Dans le cas général, les prélèvements destinés à établir la conformité (essais sur béton frais et sur béton durci, y compris essais de durabilité) doivent être réalisés en sortie de pompe.

Note - des dispositions spécifiques relatives à la conduite des épreuves de convenance et de contrôle sont définies dans les § 7.2.2 et 8.2.1, dans le cas où les teneurs en air occlus seraient réalisées avant pompage lors des épreuves de contrôle.

6.2 Essais sur béton frais

6.2.1 Consistance

La consistance du béton frais est à mesurer selon les méthodes d'essais décrites par la norme NF EN 206/CN.

6.2.2 Teneur en air occlus

Les mesures de teneur en air doivent être réalisées avec un appareillage vérifié au moins une fois par an. Les corrections consécutives à l'étalonnage doivent être prises en compte si elles dépassent une valeur d'environ 0,5 point de pourcentage. En plus du volume de la cuve, les points de vérification doivent porter au minimum sur les valeurs de teneur en air suivantes :

- 0 %,
- une valeur d'encadrement basse de la plage de contrôle visée,
- une valeur d'encadrement haute de la plage de contrôle visée.

Note - À titre informatif, des valeurs prises dans les plages de 3 à 4 % et de 8 à 9 % sont classiquement utilisées pour la vérification des aéromètres.

Il est rappelé que l'utilisation d'un aéromètre à colonne nécessite de corriger la pression appliquée pendant l'essai en fonction de l'altitude du lieu où est réalisé l'essai.

Note - Il est recommandé de réaliser un point de contrôle de l'aéromètre chaque jour.

6.3 Résistances en compression

Les moules doivent être conformes à la norme NF EN 12390-1. Les éprouvettes doivent être confectionnées et conservées selon les modalités de la norme NF EN 12390-2. La résistance en compression doit être déterminée à 28 jours selon la norme NF EN 12390-3.

6.4 Essais de durabilité

6.4.1 Généralités

Les essais de gel interne, d'écaillage et de détermination du facteur d'espacement doivent être réalisés sous accréditation Cofrac ou équivalent.

Les essais de durabilité sont classés en 3 catégories, selon leur finalité :

- les essais de performance,
- un indicateur de substitution aux essais de gel interne,
- un indicateur rapide en phase chantier.

a) Essais de performance

Il s'agit d'un ensemble de 3 essais permettant de caractériser directement en enceinte climatique la résistance d'une formulation de béton au gel ou au gel avec sels. Ils ne sont pas complètement performantiels dans la mesure où ils ne permettent pas d'associer, à un résultat, une valeur en termes de durée d'utilisation de projet. En revanche, ils permettent de statuer sur la résistance au gel, avec ou sans sels, pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans. Leur réponse est donc binaire, du type : conforme / non conforme.

Essais concernés :

- essai de gel dans l'air – dégel dans l'eau, selon la norme NF P 18-425,
- essai de gel dans l'eau – dégel dans l'eau, selon la norme NF P 18-424,
- essai d'écaillage (gel en présence de sels), selon la norme XP P 18-420.

Le choix entre les deux types d'essais de gel interne s'effectue selon les prescriptions du tableau 9.

Tableau 9
Détermination de la norme d'essai de gel interne à utiliser

		Types de gel	
		Faible ou modéré	Sévère
Saturation en eau (§ 2.3.3.1)	Faible	Non concerné	NF P 18-425
	Forte	NF P 18-425	NF P 18-424

b) Indicateur de substitution aux essais de gel interne

Dans certains cas (cf. annexe B4), il est possible de substituer aux essais de gel interne un essai de détermination du facteur d'espacement. Cette démarche ne concerne que la résistance au gel interne. Elle s'applique aux bétons formulés avec un adjuvant entraîneur d'air.

Note - Du fait de sa simplicité d'utilisation et de la rapidité d'obtention des résultats, il est recommandé d'utiliser cette démarche chaque fois que possible.

Essai concerné :

- facteur d'espacement des bulles d'air, selon ASTM C 457-98.

Note - Cette norme sera remplacée par la norme française XP P 18-465 dès parution de cette dernière.

La méthode de comptage par point modifiée (méthode manuelle) est la seule autorisée.

Note - La norme ASTM propose la réalisation de comptages de manière manuelle ou par analyse d'image. La méthode par analyse d'image ne permet pas actuellement d'identifier les différentes phases (pâte-granulat) de manière fiable et robuste sur une large gamme de formulations de béton. Ces valeurs étant indispensables pour finaliser le calcul, les méthodes d'analyse d'image ne sont pas retenues dans le cadre des présentes recommandations.

c) Indicateur rapide en phase chantier

Le contrôle de la teneur en air occlus, selon la norme NF EN 12350-7, permet de s'assurer que la teneur en air reste dans la gamme de valeurs ayant permis de valider, en épreuve d'étude et de convenance, la conformité :

- des essais de durabilité vis-à-vis du gel et de l'écaillage,
- des résistances en compression,
- des consistances.

6.4.2 Description sommaire des essais de durabilité

Un rappel des principales caractéristiques des essais est fourni en annexe B6.

6.4.3 Échéances de mise en enceinte climatique pour la réalisation des essais de performance

Les normes d'essais prévoient une application des cycles de gel/dégel à partir de 28 ou 31 jours d'âge du béton. Dans le cas général, ces délais doivent être impérativement respectés, y compris dans le cas où l'on utiliserait des constituants développant une meilleure résistance au gel avec ou sans sels à une échéance ultérieure (par exemple, dans le cas de certaines additions pouzzolaniques).

Note - L'attention est attirée sur le fait, qu'à la différence des phénomènes de corrosion (très lents du fait notamment du temps nécessaire à la pénétration du front de carbonatation et/ou de chlorures au droit des armatures), les dégradations dues au gel avec ou sans sels peuvent survenir dès le premier hiver.

Dans le cas particulier où le planning chantier garantit qu'il n'y aura pas d'exposition aux sels de déverglaçage avant 90 jours (cas courant lors de la construction d'ouvrages neufs), il est possible de réaliser les essais de la manière suivante :

- si la validation du gel interne se fait par des essais en enceinte climatique, la mise en machine doit être réalisée à 28 jours d'âge (conformément aux normes NF P 18-424 et NF P 18-425) ;
- pour la validation de la résistance à l'écaillage, deux essais doivent être lancés en parallèle : un essai avec mise en enceinte climatique à (31 ± 1) jours (conformément à la norme XP P 18-420) et un essai avec mise en enceinte climatique à (93 ± 1) jours.

Pour les essais d'écaillage réalisés avec une mise en enceinte climatique à (93 ± 1) jours, par dérogation à la norme XP P 18-420 de mai 2012, les durées de conservation des corps d'épreuve devront être modifiées comme suit :

- étape 1 de la norme XP P 18-420 : conservation en eau jusqu'à (77 ± 1) jours dans l'eau selon les dispositions de la norme NF EN 12390-2,
- étape 2 de la norme XP P 18-420 : depuis la fin de l'étape 1 jusqu'à l'âge de (90 ± 1) jours.

Note - L'essai d'écaillage à 31 jours permet de voir l'évolution du résultat entre 28 et 90 jours de cure. La conformité est statuée sur l'essai à 90 jours (obtention du résultat à 5 mois).

Note - L'attention est attirée sur le fait que ces dispositions ne sont pas applicables si l'ouvrage est soumis à un brouillard salin du fait de sa situation (par exemple : construction d'un ouvrage d'art non soumis directement aux sels de déverglaçage la première année mais franchissant une portion d'autoroute salée).

La mise en place de ces dispositions est à valider par le maître d'œuvre, qui a toute latitude pour les accepter ou les refuser sur la base de l'avis de son contrôle extérieur.

Chapitre 7.

Critères de conformité

7.1 Consistance

Pour les épreuves d'étude et de convenance, lorsqu'un suivi de rhéologie est réalisé, les valeurs de consistance doivent être conformes à la plage ou à la valeur cible spécifiée sur la durée comprise entre l'arrivée prévue sur chantier et la durée pratique d'utilisation du béton t_m .

En contrôle, les valeurs de consistance doivent être conformes à la plage ou à la valeur cible spécifiée pour la réception sur chantier.

7.2 Teneur en air occlus des bétons formulés avec un adjuvant entraîneur d'air

Pour les bétons formulés avec un adjuvant entraîneur d'air, la plage d'acceptabilité pour la teneur en air occlus est déterminée au moyen des résultats issus des références d'utilisation et/ou des épreuves d'étude et de de convenance.

7.2.1 Épreuves d'étude et de convenance

Les grandeurs suivantes sont définies à l'issue de chaque épreuve :

- A_L : teneur minimale en air occlus permettant de garantir la résistance au gel du béton sur la base, d'un essai de performance selon les normes NF P 18-424 / NF P 18-425 ou de la détermination du facteur d'espacement ;
- B_C : teneur en air occlus maximale garantissant l'obtention d'une valeur de résistance en compression conforme au niveau des épreuves d'étude et de convenance.

Note – La valeur de teneur en air occlus ne suffit pas en elle-même à caractériser la résistance au gel interne d'un béton. Cette valeur ne rend pas compte de la répartition spatiale des bulles d'air (taille moyenne, espacement moyen, etc.), alors qu'il s'agit d'un paramètre fondamental. Par ailleurs, l'air étant incorporé à la pâte, la teneur en air dépend directement du volume de pâte et donc de l'étendue granulaire. À titre indicatif, on peut donner les ordres de grandeurs classiques des teneurs en air occlus suivants obtenus sur bétons formulés avec un adjuvant entraîneur d'air :

- béton 0/40 mm : 3 à 7 %,
- béton 0/20 mm : 4 à 8 %,
- béton 0/16 mm : 5 à 9 %,
- béton 0/10 mm : 6 à 10 %.

7.2.2 Épreuves de contrôle

En contrôle :

- la teneur en air occlus doit être comprise dans l'intervalle $[A_L - 0,5 ; \min (B_C ; A_L + 5,0)]$,

- la valeur de A_L est à considérer comme une valeur spécifiée de teneur en air au sens de la norme NF EN 206/CN. Par cohérence avec cette norme, des valeurs ponctuelles comprises dans l'intervalle $[A_L - 0,5 ; A_L]$ sont acceptables :

- les valeurs inférieures à $A_L - 0,5$ sont à considérer comme non-conformes,
- les valeurs comprises dans l'intervalle $[A_L - 0,5 ; A_L]$ doivent donner lieu à une alerte au niveau de la centrale à béton,
- à partir de l'obtention d'une 3e valeur comprise dans l'intervalle $[A_L - 0,5 ; A_L]$, le producteur doit ajuster la teneur en adjuvant entraîneur d'air et justifier de cette adaptation.

Note - En cas d'obtention d'une valeur en limite de conformité, il convient de refaire une fois la mesure avant de déclarer la production non-conforme. L'attention est attirée sur le fait que les conditions de vibration influent fortement sur le résultat d'essai (batterie d'aiguille vibrante déchargée...).

Note - Les termes « - 0,5 » et « + 5,0 » découlent des exigences de la norme NF EN 206/CN sur la conformité des teneurs en air des bétons ayant une spécification au niveau de cette grandeur. Des exemples d'application sont fournis dans l'annexe B7.3.

Cas des bétons mis en place par pompage

Dans le cas général, les prélèvements destinés à établir la conformité (essais sur béton frais et sur béton durci, y compris essais de durabilité) doivent être réalisés en sortie de pompe.

Dans le cas où les essais sur bétons frais sont réalisés avant pompage, les valeurs de teneur en air occlus seront interprétées en tenant compte de la variation éventuelle de teneur en air occlus constatée sous l'effet du pompage pendant l'épreuve de convenance.

7.3 Résistance en compression

Pour chaque prélèvement, sont réalisées trois éprouvettes pour la détermination de la résistance en compression à 28 jours. Le résultat applicable au prélèvement correspond à la moyenne arithmétique des mesures effectuées sur ces trois éprouvettes, en excluant de la moyenne les essais avec rupture incorrecte, et en corrigeant les résistances suivant les règles définies dans la norme NF EN 206/CN en fonction des dimensions des éprouvettes.

Les résistances en compression doivent être conformes aux seuils définis dans le tableau 10

Tableau 10
Critères de conformité des résistances en compression

	Formule nominale	Formule dérivée avec moins d'air	Autres formules dérivées
Étude/Convenance	$f_{CE} \geq f_{ck} + m$	Pas d'exigence	$f_{CE} \pm 0,15 f_{CE}$
Contrôle	$\overline{f_c} \geq f_{ck} + k_1$ et $f_{c1} \geq f_{ck} - 4$ (MPa)	Pas d'exigence	Pas d'exigence

Avec :

- f_{ck} : résistance caractéristique en compression du béton,
- f_{CE} : résistance en compression sur formule nominale obtenue en épreuve d'étude ou de convenance,

- k_1 : paramètre lié à l'estimation de l'écart type,
- m : marge de sécurité,
- f_{c1} : la plus petite des valeurs du lot,
- \bar{f}_c : moyenne arithmétique des résultats sur les différents prélèvements du lot (minimum de 3 valeurs).

Les valeurs de m et k_1 doivent être spécifiées dans le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) du marché. En l'absence de spécification, les critères d'acceptation seront ceux du fascicule 65 du CCTG travaux.

7.4 Essais de performance et facteur d'espacement

Les seuils de conformité applicables aux essais de durabilité au gel avec ou sans sels sont définis dans le tableau 11 pour les épreuves d'étude et de convenance et dans le tableau 12 pour l'épreuve de contrôle.

Tableau 11
Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sel en épreuve d'étude et de convenance

Types d'essais	Mesures	Béton G	Béton G + S
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 400	≤ 400
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 75	≥ 75
Alternative à l'essai de gel interne	Facteur d'espacement (μm)	≤ 250	≤ 200
Essai d'écaillage	Écaillage (g/m^2)	Pas d'exigence	Cas général : ≤ 600
			Béton architectonique : $\leq 150^{(1)}$

(1) La qualification « béton architectonique » doit être prescrite au marché pour que ce seuil soit applicable.

Tableau 12
Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sel en épreuve de contrôle

Types d'essais	Mesures	Béton G	Béton G + S
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 500	≤ 500
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 60	≥ 60
Alternative à l'essai de gel interne	Facteur d'espacement (μm)	≤ 300	≤ 250
Essai d'écaillage	Écaillage (g/m^2)	Pas d'exigence	Cas général : ≤ 750
			Béton architectonique : $\leq 200^{(1)}$

(1) La qualification « béton architectonique » doit être prescrite au marché pour que ce seuil soit applicable.

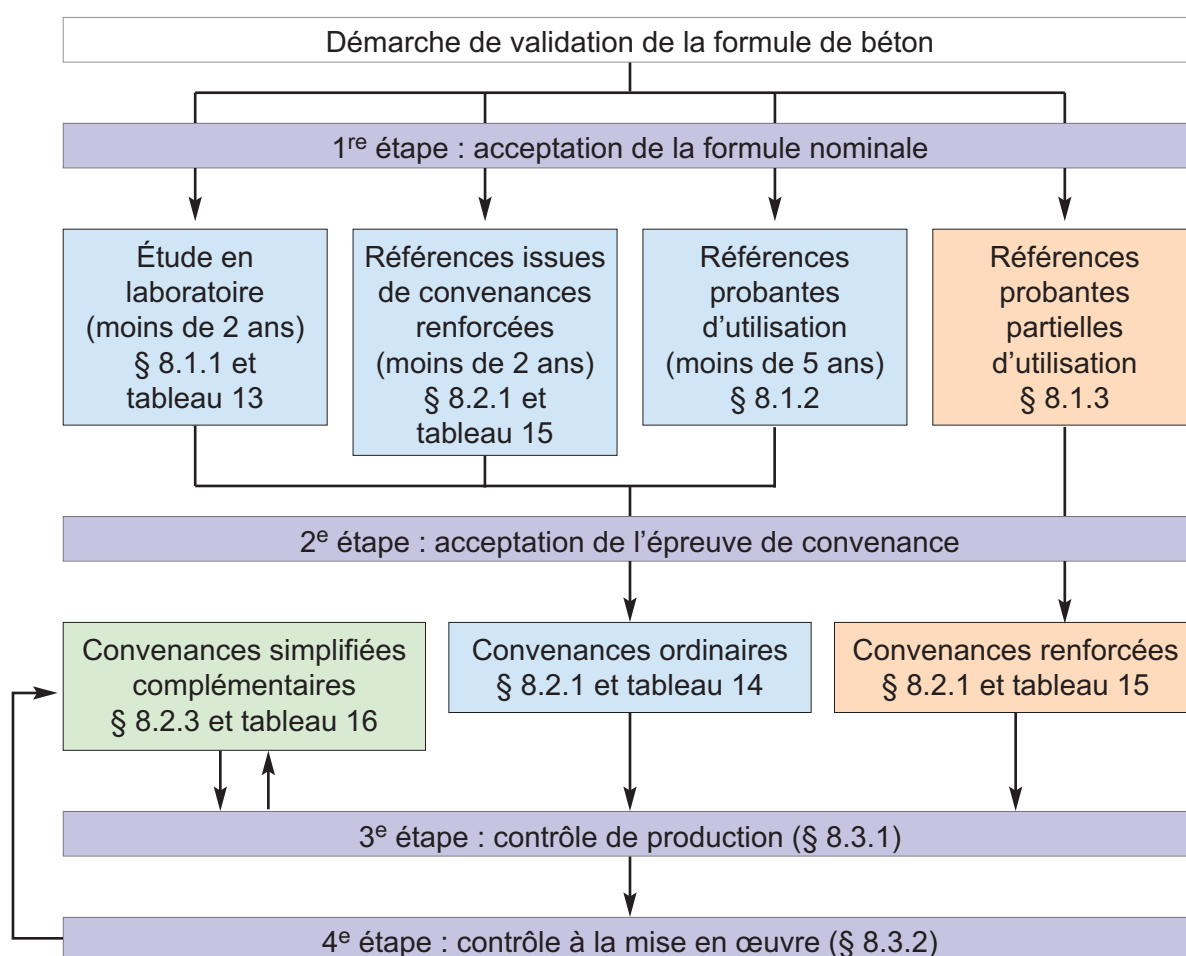
Note - Les seuils utilisés en contrôle découlent de l'application d'un coefficient d'environ 1,2 par rapport aux seuils utilisés pour les épreuves d'études et de convenance, afin de prendre en compte les hétérogénéités de fabrication en centrale à béton ou en usine de préfabrication

Chapitre 8. Épreuves

La notion de famille de bétons définie dans la norme NF EN 206/CN n'est pas retenue pour ce qui concerne les épreuves d'étude, de convenance et de contrôle.

La démarche générale de validation d'une formule, de l'épreuve de convenance et de contrôle de production et de réception est exposée en figure 7.

Figure 7
Étapes de validation de la formule de béton



Une justification des compositions est proposée par l'entreprise au maître d'œuvre et fait l'objet d'un point d'arrêt. Elle doit être effectuée selon l'une des quatre modalités suivantes (étape 1) :

- épreuve d'étude de laboratoire (§ 8.1.1 et tableau 13),
- références issues de convenances renforcées antérieures (§ 8.2.1 et tableau 15),
- références probantes d'utilisation (§ 8.1.2),
- références probantes partielles d'utilisation (§ 8.1.3).

Les formulations de béton donnent ensuite lieu à l'organisation d'épreuves de convenance, dans toutes les centrales concernées pour un chantier donné par la production des bétons G et G + S. Selon les modalités de validation de la formule nominale, deux types de convenances peuvent être organisées (étape 2, § 8.2.1) :

- les convenances ordinaires (§ 8.2.1 et tableau 14),
- les convenances renforcées (§ 8.2.1 et tableau 15).

En cas d'adaptation à la marge de la composition du béton, des convenances simplifiées complémentaires doivent être organisées (§ 8.2.3 et tableau 16).

Les bétons font ensuite l'objet d'un contrôle de production (étape 3, § 8.3.1) et à la mise en œuvre sur le site de bétonnage (étape 4, § 8.3.2).

Les modalités d'intervention du contrôle extérieur sont définies au § 3.2.2.3.

8.1 Études et références

8.1.1 Épreuve d'étude

Dispositions générales

L'épreuve d'étude a pour but de déterminer la quantité de chacun des constituants permettant d'atteindre les objectifs définis dans le marché. Elle est conduite et interprétée conformément à l'article 8.2.1 du fascicule 65 du CCTG travaux, complété par les dispositions décrites ci-dessous.

Elle est constituée par la réalisation de 3 gâchées nominales et de plusieurs gâchées dérivées destinées à :

- étudier la reproductibilité des gâchées, en particulier dans le cas de l'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air,
- déterminer la consistance et le maintien en rhéologie,
- évaluer la résistance en compression à 28 jours,
- caractériser le comportement du béton au gel interne, ou au gel interne et à l'écaillage,
- évaluer la fourchette admissible d'air entraîné, en cas d'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air (cf. annexe B4).

En cas d'utilisation de pigments ou de fibres, ces constituants doivent être intégrés dès l'épreuve d'étude.

Conduite de l'épreuve d'étude

La conduite de l'épreuve d'étude, selon que le béton est formulé avec ou sans adjuvant entraîneur d'air, est donnée dans le tableau 13.

Après avoir prélevé la quantité de béton nécessaire à la première série d'essais au temps t , le reste de la gâchée est maintenu jusqu'à t_m au moyen d'un dispositif approprié (malaxeur à vitesse variable, simulateur de transport de béton, cuve d'attente, etc.) permettant de simuler le temps de transport du béton sur le site y compris sa durée de mise en œuvre.

Critères de conformité de l'épreuve d'étude

L'épreuve d'étude est réputée probante si les conditions suivantes sont remplies :

- la consistance mesurée se trouve dans la fourchette requise entre le temps d'arrivée du béton sur chantier et t_m ,
- les valeurs de résistances en compression sont conformes aux prescriptions du § 7.3,

- les résultats des essais de durabilité au gel avec ou sans sels (gel interne / facteur d'espacement, écaillage) sont conformes aux seuils prescrits (§ 7.4).

Tableau 13

Épreuve d'étude des bétons G et G+S formulés avec ou sans adjuvant entraîneur d'air

Contenu de l'épreuve d'étude	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽³⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽⁴⁾	Teneur en air occlus du béton frais (%) ⁽⁵⁾	Résistance au gel interne ⁽¹⁾		Résistance à l'écaillage ⁽²⁾
					Essai de gel interne (% , $\mu\text{m}/\text{m}$) ⁽⁶⁾	Facteur d'espacement (μm) ⁽⁷⁾	Écaillage (g/m^2) ⁽⁸⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁹⁾ et t_m⁽¹⁰⁾							
t	1	X	X	X		X	
t_m	1	X	X	X	X	X	X
t_m	2	X	X	X			
t_m	3	X	X	X			
Si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air : études des dérivées en air au sein d'une plage [A_e-x, A_e+y]⁽¹¹⁾ par rapport à la formule nominale, à t_i⁽⁹⁾ ⁽¹²⁾							
-z % ⁽¹⁴⁾	4	X	X	X		X	(15)
+z % ⁽¹⁴⁾	5	X	X	X			
Études des dérivées en eau par rapport à la formule nominale, à t_m⁽¹⁰⁾							
- 10 l d'eau ⁽¹³⁾	6	X	X	X			
+ 10 l d'eau ⁽¹³⁾	7	X	X	X	X	X	X

(1) Concerne les bétons G et G + S.

(2) Concerne les bétons G + S.

(3) Selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.

(4) Il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître suffisamment tôt l'incidence éventuelle de l'air entraîné sur les résistances mécaniques.

(5) Selon la norme la norme NF EN 12350-7, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

(6) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a), à réaliser obligatoirement si absence d'adjuvant entraîneur d'air, alternative possible au facteur d'espacement dans les autres cas.

(7) Selon la norme ASTM C457-98, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

(8) Selon la norme XP P 18-420.

(9) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication d'une gâchée.

(10) En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes. Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués, il est réduit à 30 minutes.

(11) L'étude de la sensibilité de la formule à la quantité d'air entraîné consiste à faire varier la quantité d'air entraîné dans une plage $[A_L, A_e, B_C]$. Le choix de cet encadrement est important car il conditionne le critère d'acceptation des teneurs en air occlus sur chantier.

Note - La méthodologie est présentée en annexe B4, un exemple d'application est proposé en annexe B7.

(12) Ces essais servent à corréliser la teneur en air occlus aux résultats du facteur d'espacement. En cas de teneur en air excessive, il est important d'attendre que l'air en excès s'échappe avant de mesurer de la teneur en air.

(13) L'ajustement porte sur l'eau efficace. Les valeurs de variation de la quantité d'eau peuvent être ramenées à ± 5 l si nécessaire, en fonction de la sensibilité de la formulation. C'est notamment le cas des bétons autoplaçant et des bétons à hautes performances. L'encadrement testé doit être compatible avec la maîtrise effective de la teneur en eau du béton lors de sa production.

(14) Écart de dosage en adjuvant entraîneur d'air entre la formule nominale et les dérivées en air en épreuve d'étude.

(15) Par rapport aux recommandations de 2003, l'abandon de l'essai d'écaillage sur la dérivée avec moins d'air en G + S se justifie par la dissociation phénoménologique entre le gel interne et l'écaillage (chapitre 1) et la vérification de la résistance au gel interne du béton (vérifiée par l'essai de gel interne ou le L_{barre} , associé à la conformité de la résistance en compression).

8.1.2 Références probantes d'utilisation au sens de la durabilité au gel avec ou sans sels

Le béton est considéré comme disposant de références probantes d'utilisation au sens de la durabilité au gel si toutes les conditions suivantes sont remplies.

Il a déjà fait l'objet d'une épreuve d'étude ou d'une convenance renforcée datant de moins de 5 ans, d'une épreuve de convenance et d'épreuves de contrôle concluantes.

Il a été antérieurement fabriqué et mis en œuvre dans des conditions équivalentes à celles de la fourniture considérée. L'équivalence est appréciée en fonction des critères suivants :

- caractères identiques du matériel de fabrication ou qualité au moins égale,
- durée prévisible de transport et d'attente du béton pas plus défavorable, en tenant compte des conditions climatiques prévisibles.

Les éléments transmis peuvent être issus de fabrications réalisées à partir de plusieurs unités de production.

La composition du béton est identique, à l'exception des adaptations prévues ci-dessous :

- les constituants sont identiques, en particulier de même nature, composition, caractéristiques essentielles et provenance. Les seules adaptations mineures suivantes sont admises :
 - adaptation des proportions des granulats (en cas de modification des coupures granulaires en carrière) avec maintien de la granulométrie du béton,
 - adaptation du dosage en adjuvants sous réserve de ne pas augmenter le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{iant eq}}$ et de maintenir conformes les valeurs de consistance et (le cas échéant) de teneur en air.
- tous les autres types d'adaptation sont exclus (y compris fibres, colorants, etc.).

Les derniers résultats obtenus en cours de chantier datent de moins de deux ans.

Les résultats d'essais obtenus en cours de chantier sont conformes aux seuils prescrits en contrôle (cf. § 7) pour :

- les résultats associés à la durabilité au gel (le cas échéant : L_{barre} , essai de gel interne, essai d'écaillage),
- les résistances en compression associées aux essais de durabilité,
- les mesures de maintien de rhéologie (teneur en air occlus dans le cas d'une formule avec entraîneur d'air et consistance) associés aux essais de durabilité.

Le nombre minimal de résultats d'essais de durabilité au gel avec ou sans sels fournis issus d'une production en centrale est de 2, dont au moins 1 issu d'une production livrée et mise en œuvre sur chantier.

8.1.3 Références probantes partielles d'utilisation au sens de la durabilité au gels avec ou sans sels

Le béton est considéré comme disposant de références probantes partielles d'utilisation au sens de la durabilité au gel avec ou sans sels si toutes les conditions suivantes sont remplies.

Il ne dispose pas d'une épreuve d'étude datant de moins de 5 ans, mais dispose de résultats d'essais correspondant à des bétons livrés et mis en œuvre sur chantier conformes.

Il a été antérieurement fabriqué et mis en œuvre dans des conditions équivalentes à celles de la fourniture considérée. L'équivalence est appréciée en fonction des critères suivants :

- caractères identiques du matériel de fabrication ou qualité au moins égale ;
- durée prévisible de transport et d'attente du béton pas plus défavorable, en tenant compte des conditions climatiques prévisibles.

Les éléments transmis peuvent être issus de fabrications réalisées à partir de plusieurs unités de production.

La composition du béton est identique, à l'exception des adaptations prévues ci-dessous.

- les constituants sont identiques, en particulier de même nature, composition, caractéristiques essentielles et provenance. Les seules adaptations mineures suivantes sont admises :
 - adaptation des proportions des granulats (en cas de modification des coupures granulaires en carrière) avec maintien de la granulométrie du béton,
 - adaptation du dosage en adjuvants sous réserve de ne pas augmenter le rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq}$ et de maintenir conformes les valeurs de consistance et (le cas échéant) de teneur en air.
- tous les autres types d'adaptation sont exclus (y compris fibres, colorants, etc.).

Les résultats d'essais obtenus en cours de chantier sont conformes aux seuils prescrits en contrôle (cf. § 7) pour :

- les résultats associés à la durabilité au gel (le cas échéant : L_{barre} , essai de gel interne, essai d'écaillage),
- les résistances en compression associées aux essais de durabilité,
- les mesures de maintien de rhéologie (consistance et le cas échéant teneur en air occlus) associés aux essais de durabilité.

Le nombre minimal de résultats d'essais de durabilité au gel avec ou sans sels fournis, issus d'une production en centrale de bétons livrés et mis en œuvre sur chantier, est de 2 datant de moins de 5 ans, dont au moins 1 datant de moins de 2 ans.

8.2 Épreuve de convenance

L'épreuve de convenance, effectuée par le titulaire du marché et sous sa responsabilité, a pour but de vérifier que le béton défini par sa formule nominale et fabriqué, transporté et mis en œuvre dans les conditions du chantier satisfera aux exigences du marché. L'épreuve doit être réalisée à l'identique dans toutes les centrales à béton (principale et secours), en tenant compte des ajustements de formulation prévus par le § 8.2.2.

8.2.1 Conduite de l'épreuve de convenance

Elle doit être réalisée dans les mêmes conditions que celles du chantier, en particulier mêmes conditions d'approvisionnement des constituants, même matériel de fabrication du béton, mêmes moyens de contrôle en cours de fabrication, même durée et mêmes conditions de transport et de mise en œuvre du béton. Dans les cas particuliers où une fluidification sur chantier est prévue (adjuvant incorporé dans la cuve agitatrice, selon les modalités décrites dans les procédures du producteur de béton), l'épreuve de convenance doit permettre une validation des dispositions prévues dans le programme de bétonnage.

En cas de pompage du béton, les convenances doivent être menées en tenant compte des prescriptions décrites dans le § 6.1.

L'épreuve de convenance consiste en la réalisation de 3 gâchées répondant à la formule nominale pour effectuer un contrôle de conformité aux spécifications. Ces 3 gâchées sont mélangées dans un camion-malaxeur pendant la durée t_m . Les prélèvements et l'exécution des essais se font dans les délais compatibles avec leur interprétation dans les conditions définies ci-dessous :

- la conduite de l'épreuve de convenance, selon que le béton est formulé avec ou sans adjuvant entraîneur d'air, est donnée dans le tableau 14 pour les convenances ordinaires,
- la conduite de l'épreuve de convenance, selon que le béton est formulé avec ou sans adjuvant entraîneur d'air, est donnée dans le tableau 15 pour les convenances renforcées. Ces dispositions ne s'appliquent qu'aux formules disposant de références probantes partielles. Les convenances renforcées comprennent, en plus de la réalisation des 3 gâchées sur la formule nominale, la réalisation de gâchées dérivées sur la teneur en air et la quantité d'eau,
- les teneurs en eau des sables et gravillons et l'exactitude des doseurs volumétriques des adjuvants doivent être vérifiées avant le démarrage de l'épreuve de convenance.

Cas des bétons mis en place par pompage

Dans le cas où les essais de contrôle sur béton frais sont réalisés avant pompage, les épreuves de convenance doivent être menées de la manière suivante :

- mesures de la teneur en air et de la consistance : avant et après pompage,
- mesures des résistances en compression et essais de durabilité au gel avec ou sans sels (y compris L_{barre}) : après pompage.

Note - L'évolution constatée de la teneur en air occlus sous l'effet du pompage sera utilisée pour l'interprétation des teneurs en air lors des épreuves de contrôle (cf. § 7.2.2).

8.2.2 Ajustement de la quantité des constituants pendant l'épreuve de convenance

Dans le cadre de l'obtention de la consistance et de la teneur en air attendues pour la mise en œuvre, validées par les épreuves d'études ou par des références, les ajustements suivants sont admis :

- adaptation du dosage en adjuvant plastifiant/superplastifiant de $\pm 20 \%$,
- adaptation du dosage de l'adjuvant entraîneur d'air, dans la limite de la plage d'utilisation définie dans sa fiche technique produit.

Afin de fabriquer un béton ayant la même consistance que celle de la formule nominale issue de l'épreuve d'étude (ou des références), un ajustement d'eau dans la plage de $\pm 10 \text{ l/m}^3$ peut être effectué en convenance pour compenser l'erreur liée à la maîtrise de l'hygrométrie des granulats et/ou l'impact du changement de procédé de production (énergie de malaxage, volume de la gâchée, etc.).

8.2.3 Convenances simplifiées complémentaires

Dans le cas où la formulation de béton considérée nécessite une adaptation saisonnière de l'adjuvantation (ajout/retrait d'un accélérateur/retardateur de prise/durcissement, modification significative du dosage en adjuvant plastifiant/superplastifiant), une épreuve de convenance simplifiée complémentaire doit être réalisée suivant les principes définis au § 8.2.1 pour les bétons disposant de références probantes d'utilisation.

La conduite de l'épreuve de convenance simplifiée complémentaire, selon que le béton est formulé avec ou sans adjuvant entraîneur d'air, est donnée dans le tableau 16.

Les adaptations limitées des dosages en adjuvants en cours de chantier, destinées à garantir que la consistance et la teneur en air (si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air), restant dans les gammes validées pendant les épreuves d'étude et de convenance, ne nécessitent pas des convenances simplifiées complémentaires. Ces adaptations doivent être justifiées sur la base de mesures de consistance et de teneur en air occlus avant et après modification des dosages. Elles sont limitées à $\pm 0,2$ point de pourcent pour les adjuvants plastifiant/superplastifiant et à la limite de la plage d'utilisation définie dans la fiche technique produit pour l'adjuvant entraîneur d'air.

8.2.4 Critères de conformité des épreuves de convenance

Les épreuves de convenance (convenances, convenances renforcées ou convenances simplifiées complémentaires) sont probantes si les conditions suivantes sont remplies :

- la consistance mesurée se trouve dans la fourchette requise entre le temps arrivée du béton sur chantier et t_m ,
- la teneur en air mesurée se trouve dans la plage définie à l'issue de l'épreuve d'étude entre le temps arrivée chantier et t_m ,
- les valeurs de résistances en compression sont conformes aux prescriptions du § 7.3,
- les résultats des essais de durabilité au gel avec ou sans sels (gel interne / facteur d'espacement, écaillage) sont conformes aux seuils prescrits (§ 7.4).

Tableau 14

Épreuve de convenance des bétons G et G+S formulés avec ou sans adjuvant entraîneur d'air

Contenu de la convenance	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽³⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽⁴⁾	Teneur en air occlus du béton frais (%) ⁽⁵⁾	Résistance au gel interne ⁽¹⁾		Résistance à l'écaillage ⁽²⁾
					Essai de gel interne (% , $\mu\text{m}/\text{m}$) ⁽⁶⁾	Facteur d'espacement (μm) ⁽⁷⁾	Écaillage (g/m^2) ⁽⁸⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁹⁾ et t_m^(10 et 11)							
t_1	1 ⁽¹²⁾	X		X			
t_2	2 ⁽¹²⁾	X		X			
t_3	3 ⁽¹²⁾	X		X			
t_m	1+2+3 ⁽¹²⁾	X	X	X	X	X	X

(1) Concerne les bétons G et G + S.

(2) Concerne les bétons G + S.

(3) Selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.

(4) Il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître suffisamment tôt l'incidence éventuelle de l'air entraîné sur les résistances mécaniques.

(5) Selon la norme NF EN 12350-7, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

(6) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a), à réaliser obligatoirement si absence d'adjuvant entraîneur d'air, alternative possible au facteur d'espacement dans les autres cas.

(7) Selon la norme ASTM C457-98, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

(8) Selon la norme XP P 18-420.

(9) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication de la gâchée i .

(10) En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes à partir de t_i . Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués, il est réduit à 30 minutes.

(11) Il est recommandé de réaliser des mesures intermédiaires de consistance et de teneur en air toutes les 30 minutes entre t_i et t_m afin d'évaluer la durée pratique d'utilisation si les seuils prescrits ne sont pas atteints à t_m .

(12) Après mise en mouvement de la cuve de la bétonnière à grande vitesse de rotation (supérieure à 12 tours par minute) pendant au moins 2 minutes.

Tableau 15

Épreuve de convenance renforcée des bétons G et G + S formulés avec ou sans adjuvant entraîneur d'air

Contenu de la convenance renforcée	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽³⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽⁴⁾	Teneur en air occlus du béton frais (%) ⁽⁵⁾	Résistance au gel interne ⁽¹⁾		Résistance à l'écaillage ⁽²⁾
					Essai de gel interne (% , $\mu\text{m}/\text{m}$) ⁽⁶⁾	Facteur d'espacement (μm) ⁽⁷⁾	Écaillage (g/m^2) ⁽⁸⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁹⁾ et t_m^(10 et 14)							
t_1	1 ⁽¹⁵⁾	X		X			
t_2	2 ⁽¹⁵⁾	X		X			
t_3	3 ⁽¹⁵⁾	X		X			
t_m	1+2+3 ⁽¹⁵⁾	X	X	X	X	X	X
Si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air : études des dérivées en air au sein d'une plage [A_e-x, A_e+y]⁽¹¹⁾ par rapport à la formule nominale, à t_i⁽⁹⁾ ⁽¹²⁾							
-z % ⁽¹⁶⁾	4	X	X	X	X	X	(17)
+z % ⁽¹⁶⁾	5	X	X	X			
Études des dérivées en eau par rapport à la formule nominale, à t_m⁽¹⁰⁾ ⁽¹⁴⁾							
- 10 l d'eau ⁽¹³⁾	6	X	X	X			
+ 10 l d'eau ⁽¹³⁾	7	X	X	X	X	X	X

(1) Concerne les bétons G et G + S.

(2) Concerne les bétons G + S.

(3) Selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.

(4) Il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître suffisamment tôt l'incidence éventuelle de l'air entraîné sur les résistances mécaniques.

(5) Selon la norme NF EN 12350-7, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

(6) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a), à réaliser obligatoirement si absence d'adjuvant entraîneur d'air, alternative possible au facteur d'espacement dans les autres cas..

(7) Selon ASTM C457-98, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.

(8) Selon la norme XP P 18-420.

(9) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication de la gâchée i.

(10) En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes à partir de t_i . Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués, il est réduit à 30 minutes.

(11) L'étude de la sensibilité de la formule à la quantité d'air entraîné consiste à faire varier la quantité d'air entraîné dans une plage $[A_L, A_e, B_C]$. Le choix de cet encadrement est important car il conditionne le critère d'acceptation des teneurs en air occlus sur chantier.

Note - La méthodologie est présentée en Annexe B4, un exemple d'application est proposé en Annexe B7.

(12) Ces essais servent à corréliser la teneur en air occlus aux résultats de facteur d'espacement. En cas de teneur en air excessive, il est important d'attendre que l'air en excès s'échappe avant de faire les mesures de teneur en air.

(13) Les valeurs de variation de la quantité d'eau peuvent être ramenées à ± 5 l si nécessaire, en fonction de la sensibilité de la formulation. C'est notamment le cas des bétons autoplaçant et des bétons à hautes performances. L'encadrement testé doit être compatible avec les ajustements d'eau qui seront réalisés au niveau de la centrale à béton.

(14) Il est recommandé de réaliser des mesures intermédiaires de consistance et de teneur en air toutes les 30 minutes entre t_i et t_m afin d'évaluer la durée pratique d'utilisation si les seuils prescrits ne sont pas atteints à t_m .

(15) Après mise en mouvement de la cuve de la bétonnière à grande vitesse de rotation (supérieure à 12 tours par minute) pendant au moins 2 minutes.

(16) Écart de dosage en adjuvant entraîneur d'air entre la formule nominale et les dérivées en air en épreuve d'étude.

(17) Par rapport aux recommandations de 2003, l'abandon de l'essai d'écaillage sur la dérivée avec moins d'air en G + S se justifie par la dissociation phénoménologique entre le gel interne et l'écaillage (chapitre 1) et la vérification de la résistance au gel interne du béton (vérifiée par l'essai de gel interne ou le L_{barre} , associé à la conformité de la résistance en compression).

Tableau 16
Épreuve de convenance simplifiée complémentaire des bétons G et G+S
formulés avec ou sans adjuvant entraîneur d'air

Contenu de la convenance simplifiée	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽³⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽⁴⁾	Teneur en air occlus du béton frais (%) ⁽⁵⁾	Résistance au gel interne ⁽¹⁾		Résistance à l'écaillage ⁽²⁾
					Essai de gel interne (% , $\mu\text{m/m}$) ⁽⁶⁾	Facteur d'espacement (μm) ⁽⁷⁾	Écaillage (g/m^2) ⁽⁸⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁹⁾ et t_m^(10 et 11)							
t_i	1	X		X			
t_m	1	X	X	X	X	X	X ⁽¹²⁾

(1) Concerne les bétons G et G + S.

(2) Concerne les bétons G + S.

(3) Selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.

(4) Il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître assez tôt l'incidence éventuelle de l'air entraîné sur les résistances mécaniques.

- (5) Selon la norme NF EN 12350-7, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.
- (6) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a), à réaliser obligatoirement si absence d'adjuvant entraîneur d'air, alternative possible au facteur d'espacement dans les autres cas.
- (7) Selon la norme ASTM C457-98, si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air.
- (8) Selon la norme XP P 18-420.
- (9) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication de la gâchée i .
- (10) En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes à partir de t_i . Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués, il est réduit à 30 minutes.
- (11) Il est recommandé de réaliser des mesures intermédiaires de consistance et de teneur en air toutes les 30 minutes entre t_i et t_m afin d'évaluer la durée pratique d'utilisation si les seuils prescrits ne sont pas atteints à t_m .
- (12) Uniquement dans le cas où l'organisation de la convenance simplifiée a été motivée par l'incorporation d'un accélérateur de prise ou de durcissement.

8.3 Contrôle intérieur

8.3.1 Contrôle de production

Le producteur de béton doit vérifier chaque journée où il y a production, sur les 3 premières charges*, la conformité des mesures de consistance et de teneur en air occlus (si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air). Un contrôle de conformité de la teneur en air et de la consistance est réalisé ensuite a minima tous les 24 m³.

* Ce contrôle peut être restreint à la première charge, si aucun résultat de la veille n'était hors spécifications et si aucun recalage de dosage en adjuvant n'a été opéré.

Les prélèvements sont réalisés à la centrale à béton ou à l'usine de préfabrication. Les mesures sur béton frais sont jugées conformes si les valeurs sont comprises dans la gamme d'acceptabilité sortie centrale définie à l'issue de l'épreuve de convenance.

Note - Il est recommandé de réaliser un essai d'écaillage et/ou de gel (gel interne ou L_{barre}) pendant la durée du chantier pour être en mesure de justifier de l'existence de références probantes lors des futurs chantiers pour la formule de béton fabriquée et contrôlée.

8.3.2 Contrôle à la mise en œuvre

Pour chaque type de béton, coulé sur chantier ou en usine de préfabrication, les fréquences de contrôles a minima réalisées par l'entreprise titulaire du marché au titre du contrôle intérieur sont définies dans le tableau 17.

Les résultats des essais doivent satisfaire aux seuils définis dans le chapitre 7.

Dans le cas où le producteur et l'utilisateur constituent une même personne morale et que la production de béton est réalisée sur le site de mise œuvre, les contrôles définis ci-dessus peuvent être réalisés en sortie de centrale à béton.

Pour les bétons coulés en place, à chaque livraison, les bordereaux de livraison et de pesées doivent être fournis par le producteur de béton et vérifiés par l'entreprise avant mise en œuvre du béton.

Tableau 17
Plan de contrôle à appliquer à la mise en œuvre

Essais	Fréquences d'essais
Consistance	<p>Une mesure sur les 3* premières charges de la journée, puis 1 toutes les 24 m³.</p> <p>* la première charge uniquement, si aucun résultat de la veille n'était hors spécifications et si aucun recalage de dosage en adjuvant n'a été opéré.</p>
Teneur en air occlus (si utilisation d'adjuvant entraîneur d'air)	<p>Une mesure sur les 3* premières charges de la journée, puis 1 toutes les 24 m³.</p> <p>* la première charge uniquement, si aucun résultat de la veille n'était hors spécifications et si aucun recalage de dosage en adjuvant n'a été opéré.</p>
Facteur d'espacement (pour les niveaux de prévention G et G + S, si utilisation d'adjuvant entraîneur d'air)	<p>Une mesure par fraction $\leq 500 \text{ m}^3$ + 1 par 500 m³ supplémentaires⁽¹⁾.</p>
Essai de gel interne (pour les niveaux de prévention G et G + S, si absence d'utilisation d'adjuvant entraîneur d'air)	<p>Une mesure par fraction $\leq 1000 \text{ m}^3$ + 1 pour la première fraction de 1000 m³ supplémentaire + 1 pour chaque fraction de 2000 m³ supplémentaire, avec un minimum d'un essai tous les six mois⁽¹⁾.</p>
Écaillage (pour le niveau de prévention G + S)	

(1) Les fractions supplémentaires ne donnent lieu à essai que si la production atteint 80 % de leur valeur (respectivement 400, 800 et 1600 m³). Exemple : pour une production de 1200 m³ d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 2 déterminations du facteur d'espacement et 1 essai d'écaillage ; pour une production de 1850 m³ d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 3 déterminations de facteur d'espacement et 2 essais d'écaillage.

Chapitre 9.

Fabrication

Les installations de fabrication doivent répondre aux prescriptions définies dans l'annexe B du *fascicule 65 du CCTG travaux*. Les centrales de béton prêt à l'emploi doivent être titulaires de la marque NF-BPE ou équivalent.

La norme NF EN 13369 constitue la référence pour les produits de structure en béton fabriqués en usine.

Note – L'attention est attirée sur le fait que le dosage de faibles quantités d'adjuvant entraîneur d'air nécessite l'utilisation d'équipements adaptés et fiables.

Chapitre 10.

Mise en œuvre

Les modalités de mise en œuvre doivent répondre aux exigences de la norme NF EN 13670/CN et du fascicule 65 du CCTG travaux.

Il convient de s'attacher à développer tout le potentiel de durabilité des bétons, tant au niveau de la peau du béton, qui est le premier rempart vis-à-vis de l'exposition au gel avec ou sans sels (écaillage), que du cœur du béton (gel interne).

Or les caractéristiques de la peau sont fortement dépendantes de nombreux paramètres de mise en œuvre du béton (vibration, cure, mûrissement, finition de surface).

En ce qui concerne le gel interne, la stabilité du réseau de bulles d'air est primordiale pour les bétons contenant un adjuvant entraîneur d'air. Le délai entre le début du malaxage du béton et la fin de mise en place doit être compatible avec le maintien de la stabilité de son réseau de bulles d'air. L'augmentation de ce délai peut déstabiliser le réseau de bulles souhaité et diminuer l'efficacité de la protection contre les cycles de gel-dégel. Outre le délai de mise en œuvre, le mode de mise en œuvre des bétons (par exemple, le pompage) peut également affecter le réseau de bulles d'air.

Dans la pratique, en dehors du cas des bétons autoplaçants, les bétons sont soumis à une vibration (interne, externe, voire les deux). Celle-ci, effectuée dans les règles de l'art, permet d'éliminer les grosses bulles d'air pénalisantes pour les résistances mécaniques et ne participant nullement à la protection vis-à-vis du gel des bétons.

En revanche, il faut éviter un excès de vibration qui risque de déstabiliser le réseau de bulles d'air nécessaire à la résistance au gel des bétons, notamment au niveau de la peau du béton. Cet excès peut également amplifier le phénomène de ressuage, qui peut entraîner l'apparition de fissures ouvertes néfastes à la résistance des bétons au gel avec ou sans sels.

L'état de surface de la peau du béton joue également un rôle dans la protection vis-à-vis de l'écaillage du béton. Une finition poussée (talochage excessif par exemple) est à proscrire dans la mesure où elle favorise la formation en peau d'une couche superficielle riche en eau qui ne résistera pas au phénomène d'écaillage. Mais elle peut également déstructurer le réseau des bulles d'air à proximité de la peau du béton et réduire ainsi la résistance au gel interne.

Note – L'attention est attirée sur le fait que le parement d'un béton formulé avec un adjuvant entraîneur d'air présentera un niveau de bullage plus élevé que celui d'un béton ordinaire. L'obtention d'un parement fin au sens du fascicule 65 du CCTG travaux nécessite une attention particulière et la réalisation d'un élément témoin.

En outre, la cure des bétons est indispensable pour que le béton atteigne les propriétés escomptées : résistance mécanique (maturation suffisante avant l'exposition au premier gel), mais aussi résistance aux agressions environnementales. Elle limite les phénomènes de dessiccation excessive responsables de l'apparition des fissurations précoces favorisant la migration des agents agressifs dans le béton. La méthode de cure envisagée doit garantir un développement satisfaisant des propriétés des bétons aussi bien par temps chaud que par temps froid, ou par temps venteux.

Note - Les documents d'application nationale de la norme NF EN 13670/CN (fascicule 65 du CCTG travaux en génie civil, DTU 21 en bâtiment) donnent les spécifications pour la réalisation de la cure en fonction du type d'ouvrage.

En cas de coulage par temps froid, lorsqu'un risque de gel est avéré (températures négatives), les moyens de protection thermique du béton doivent être maintenus pendant une période suffisante permettant au béton d'atteindre une résistance mécanique suffisante supérieure ou égale à 7 MPa avant d'être exposé à des températures négatives.

En cas d'utilisation d'un traitement thermique, ce dernier devra respecter les prescriptions du § 8.3.2.5 du fascicule 65 du CCTG travaux relatives aux cycles de température.

Annexe A

Autres formulations utilisables

Cette annexe traite de six types de variantes de composition du béton :

- des formulations alternatives destinées à offrir des possibilités permettant d'appréhender plus facilement les problèmes posés :
 - par l'indisponibilité locale de granulats de résistance au gel F1,
 - par les incompatibilités générées par des exigences prescriptives fortes (notamment vis-à-vis de la réaction sulfatique interne).
- le cas particulier des bétons projetés.

Pour la mise en œuvre de ces variantes, le maître d'œuvre devra être assisté par un laboratoire de contrôle extérieur ayant une forte compétence dans le domaine de la prévention vis-à-vis du gel et des sels.

En dehors du cas des bétons projetés :

- **le maître d'œuvre a toute latitude pour accepter ou refuser ces variantes de formulation, sur la base de l'avis de son contrôle extérieur,**
- l'utilisation du concept de références probantes partielles d'utilisation, au sens du § 8.1.3, n'est pas autorisée.

A1. Formulations incluant des granulats de résistance au gel F2 à F4.

A2. Formulations ayant une teneur en laitier de hauts fourneaux supérieure à 35 % en masse du liant total.

A3. Formulations incluant des cendres volantes dans la composition du ciment ou sous forme d'addition, en combinaison avec un adjuvant entraîneur d'air.

A4. Formulations sans adjuvant entraîneur d'air incluant des ciments autres que les CEM I, CEM II/A ou B ou CEM IV.

A5. Formulations incluant des microbilles plastiques déformables en substitution de l'adjuvant entraîneur d'air.

A6. Dispositions relatives aux bétons projetés.

Annexe A1

Formulations incluant des granulats de résistance au gel F2 à F4

A1.1 Cadre d'utilisation

Cette annexe traite des bétons formulés avec des granulats ne pouvant pas être classés F1 (et donc des granulats F2 à F4) mais répondant à l'ensemble des autres dispositions du § 4.1.

A1.2 Avantages/risques

Les bétons formulés avec ce type de granulats présentent un risque maîtrisé dans la mesure où les granulats ne dérogent que par leur résistance au gel et que cette caractéristique peut être évaluée directement par un essai de performance réalisé sur le béton.

Si ces granulats ont déjà été utilisés dans un contexte similaire, la possibilité d'utiliser des références probantes d'utilisation permet une validation en amont aisée.

En l'absence de références probantes d'utilisation, le délai nécessaire à la validation de l'utilisation des granulats au moyen d'essais de performances sur béton doit être prévu (3,5 mois).

A1.3 Éléments justificatifs à apporter

Références probantes d'utilisation ou épreuve d'étude béton basée sur la réalisation des essais de performance requis.

Note - La validation des granulats peut être menée en même temps que la validation des formulations des bétons du chantier.

A1.4 Dispositions spécifiques pour valider l'utilisation des granulats

Les dispositions décrites ci-dessous permettent de valider l'utilisation des granulats pour la formulation de bétons de niveau de prévention G ou G + S.

Deux méthodologies peuvent être utilisées pour valider l'utilisation des granulats :

- justification de références probantes d'utilisation des granulats du point de vue de la durabilité au gel avec ou sans sels,
- réalisation d'une épreuve d'étude spécifique.

Références probantes d'utilisation des granulats du point de vue de la durabilité au gel avec ou sans sels

Les granulats sont réputés disposer de références probantes si l'ensemble des exigences suivantes sont respectées :

- ils ont déjà été utilisés dans un béton présentant des caractéristiques inférieures ou égales à celles du béton retenu pour le chantier, à savoir :
 - rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant eq}$ supérieur ou égal à celui de la formule nominale du béton testé en épreuve d'étude pour le chantier,
 - résistance en compression mesurée à 28 jours inférieure ou égale à celle de la formule nominale du béton testé en épreuve d'étude pour le chantier,

- mêmes granulats (nature, origine),
- même squelette granulaire,
- même modalité de formulation (avec ou sans entraîneur d'air).
- les essais ont été menés conformément aux dispositions spécifiques suivantes :
 - pour une utilisation dans des bétons G, réalisation d'un essai de gel interne sur béton (norme NF P 18-424 ou NF P 18-425),
 - pour les bétons G+S, réalisation d'un essai de gel interne sur béton (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) et d'un essai d'écaillage sur béton (norme XP P 18-420).
- les essais datent de moins de 2 ans.

Les essais de gel interne doivent avoir été réalisés avec une norme d'essai (norme NF P 18-424 ou NF P 18-425) compatible avec l'exposition de la partie d'ouvrage (§ 6.4.1.a).

Les résultats d'essais doivent être conformes aux seuils définis dans le § 7.4.

Contenu de l'épreuve d'étude spécifique

Pour une utilisation dans des bétons G, la validation des granulats doit être basée sur un essai de gel interne sur béton (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425).

Pour les bétons G + S, la validation de l'utilisation des granulats doit être basée sur un essai de gel interne sur béton (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) et un essai d'écaillage sur béton (XP P 18-420).

Le choix du type d'essai (normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) est à réaliser selon les dispositions du § 6.4.1.a.

Les seuils de conformité à utiliser pour l'interprétation des résultats d'essais sont ceux définis dans le §7.4.

Les essais sont à réaliser sur les compositions de béton prévues pour le chantier.

A1.5 Autres dispositions

Une fois l'agrément donné par le maître d'œuvre vis-à-vis de l'utilisation des granulats, l'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception de l'exigence relative à l'utilisation de granulats ayant une résistance au gel F1.

Annexe A2

Formulations ayant une teneur en laitier de hauts fourneaux supérieure à 35 % en masse du liant total

A2.1 Cadre d'utilisation

Sont concernées les compositions de béton formulées avec une teneur en laitier du liant total (cumul de la quantité de laitier dans le ciment et de l'apport en tant qu'addition et de correcteur granulométrique) supérieure à 35 % en masse, dans le respect des limites de compositions définies dans le fascicule 65 du CCTG travaux.

A2.2 Dispositions spécifiques pour les bétons G

Formulations avec $L_{\text{barre}} \leq 150 \mu\text{m}$

Note - La valeur de 150 μm est basée sur une prise en compte sécuritaire des conclusions du rapport 2008 de l'ATILH « Évaluation de la durabilité des bétons de CEM III soumis au gel sévère : vers une possible introduction de ce type de ciment dans les recommandations ».

L'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception des points suivants :

- ciments (§ 4.2) : rajout des ciments CEM III/A ou B à la liste des ciments du tableau 5,
- additions (§ 4.3) : possibilité d'utiliser les laitiers de hauts fourneaux au-delà de 35 %, dans le respect des dispositions prévues par le fascicule 65 du CCTG travaux,
- critères de conformité (§ 7.4) : remplacement des tableaux 11 et 12 par les tableaux 18 et 19.

Tableau 18

Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel en épreuve d'étude et de convenance

Essais	Mesures	G
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 400
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 75
Alternative à l'essai de gel interne	Facteur d'espacement (μm)	≤ 150

Tableau 19

Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel en épreuve de contrôle

Essais	Mesures	G
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 500
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 60
Alternative à l'essai de gel interne	Facteur d'espacement (μm)	≤ 200

Note - Les seuils utilisés en contrôle découlent de l'application d'un coefficient d'environ 1,2 par rapport aux seuils utilisés pour les épreuves d'étude et convenance, afin de prendre en compte les hétérogénéités de fabrication en centrale à béton ou en usine de préfabrication.

Formulations avec $L_{\text{barre}} > 150 \mu\text{m}$

L'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception des points suivants :

- ciments (§ 4.2) : rajout des ciments CEM III/A ou B à la liste des ciments du tableau 5,
- additions (§ 4.3) : possibilité d'utiliser les laitiers de hauts fourneaux au-delà de 35 %, dans le respect des dispositions prévues par le fascicule 65 du CCTG travaux,
- critères de conformité : remplacement du chapitre 7 par le § B5.2,
- épreuve d'étude (§ 8.1) : les dispositions à appliquer sont décrites dans le § B5.3.

Note - Les formulations avec des laitiers de hauts fourneaux présentent un intérêt dans le cadre de parties d'ouvrages fortement concernées par le risque RSI. Du fait du manque de recul sur la tenue au gel des formulations avec un $L_{\text{barre}} > 150 \mu\text{m}$, une méthode de validation performantielle a été développée pour permettre leur utilisation en toute sécurité dans le cadre de la résistance au gel pur.

A2.3 Dispositions spécifiques pour les bétons G + S

Cadre d'utilisation

Deux types de compositions sont concernés :

- bétons G + S formulés avec des ciments de type CEM III/A ou B,
- bétons G + S formulés comme des bétons d'ingénierie avec laitier de hauts fourneaux.

Avantages/risques

Dans le cas général, les formulations avec plus de 35 % de laitier de hauts fourneaux (incorporé par la composition du ciment ou directement dans le béton sous forme d'addition) ne parviennent pas à passer avec succès l'essai d'écaillage à 28 jours. Elles nécessitent donc des études spécifiques menées par des laboratoires spécialisés. Ces compositions présentent cependant un intérêt dans le cadre de parties d'ouvrages fortement concernées par le risque RSI.

Éléments justificatifs à apporter

Le planning du chantier doit permettre, en cas de résultat non conforme à l'essai d'écaillage, de revenir à une formulation basée sur les ciments autorisés par le tableau 5 du § 4.2.

Note - Il est également possible de mener en parallèle les deux types d'études.

Dispositions spécifiques

L'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception du point suivant :

- ciments (§ 4.2) : rajout des ciments CEM III/A ou B à la liste des ciments du tableau 5,
- additions (§ 4.3) : possibilité d'utiliser les laitiers de hauts fourneaux au-delà de 35 %, dans le respect des dispositions prévues par le fascicule 65 du CCTG travaux,
- pour justifier la résistance au gel interne, les dispositions applicables sont celles décrites dans le chapitre « Dispositifs spécifiques pour les bétons G » de la présente annexe.

Annexe A3

Formulations incluant des cendres volantes dans la composition du ciment ou sous forme d'addition, en combinaison avec un adjuvant entraîneur d'air

A3.1 Cadre d'utilisation

Sont concernées les compositions de béton formulées avec un adjuvant entraîneur d'air et utilisation de cendres volantes (dans la composition du ciment ou sous forme d'addition ou de correcteur granulométrique).

Note - Du fait de la présence d'imbrulés, susceptibles d'altérer l'efficacité de l'adjuvant entraîneur d'air, des dispositions spécifiques doivent être prises pour s'assurer de la conformité de la teneur en air occlus dans le béton frais.

A3.2 Dispositions spécifiques

L'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception des points suivants :

- ciments (§ 4.2) : remplacement du tableau 5 par le tableau 20,
- additions (§ 4.3) : remplacement du tableau 6 par le tableau 21,
- contrôle intérieur (§ 8.3.2) : remplacement du tableau 17 par le tableau 22.

Tableau 20
Ciments autorisés pour les bétons G et G + S

Caractéristiques du béton	Spécifications Béton G ou G + S
Formulations avec un adjuvant entraîneur d'air	CEM I ou CEM II/A ou B ou CEM IV

Dans le cas des bétons G + S, les ciments doivent être de type PM ou résistant aux sulfates.

Tableau 21
Additions autorisées pour les bétons G et G + S

Caractéristiques du béton	Spécifications (type et classe) Béton G ou G + S
Formulations avec un adjuvant entraîneur d'air	Additions autorisées par le tableau 8B du fascicule 65 du CCTG travaux

Dans le cas des bétons G + S, le liant répond aux exigences de fascicule de documentation FD P18-011.

Tableau 22
Plan de contrôle à appliquer à la mise en œuvre

Essais	Fréquences d'essais
Consistance	Une mesure sur les 3* premières charges de la journée, puis 1 toutes les 24 m ³ . * la première charge uniquement, si aucun résultat de la veille n'était hors spécifications et si aucun recalage de dosage en adjuvant n'a été opéré.
Teneur en air occlus	Toutes les charges doivent être contrôlées.
Facteur d'espacement (pour les niveaux de prévention G et G + S)	Une mesure par fraction $\leq 500 \text{ m}^3$ + 1 par 500 m ³ supplémentaires ⁽¹⁾ .
Écaillage (pour le niveau de prévention G + S)	Une mesure par fraction $\leq 1000 \text{ m}^3$ + 1 pour la première fraction de 1000 m ³ supplémentaire + 1 pour chaque fraction de 2000 m ³ supplémentaire, avec un minimum d'un essai tous les six mois ⁽¹⁾ .

(1) Les fractions supplémentaires ne donnent lieu à essai que si la production atteint 80 % de leur valeur (respectivement 400, 800 et 1600 m³). Exemple : pour une production de 1200 m³ d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 2 déterminations du facteur d'espacement et 1 essai d'écaillage ; pour une production de 1850 m³ d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 3 déterminations de facteur d'espacement et 2 essais d'écaillages.

Annexe A4

Formulations sans adjuvant entraîneur d'air incluant des ciments autres que les CEM I, CEM II/A ou B ou CEM IV

A4.1 Cadre d'utilisation

Ce chapitre traite des bétons G formulés sans adjuvant entraîneur d'air et avec des ciments autres que les CEM I, CEM II/A ou B ou CEM IV.

A4.2 Avantages/risques

Ce type de formulation dispose de moins de recul que les formulations utilisant les ciments décrits dans le § 4.2.

Néanmoins, le risque lié à leur utilisation est maîtrisé dans la mesure où la résistance au gel interne est évaluée directement par un essai de performance.

Le délai de réalisation de l'essai de gel interne (3,5 mois) doit être pris en compte lors de la préparation du chantier.

A4.3 Éléments justificatifs à apporter

Le planning du chantier doit permettre, en cas de résultat non conforme au niveau de l'essai de gel interne, de revenir à une formulation basée sur les ciments autorisés par le tableau 5 du §4.2.

Note - Il est également possible de mener en parallèle les deux types d'études.

A4.4 Dispositions spécifiques

L'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception du tableau 5 du § 4.2.

Annexe A5

Formulations incluant des microbilles plastiques déformables en substitution de l'adjuvant entraîneur d'air

A5.1 Cadre d'utilisation

Sont concernées les compositions de béton G ou G + S formulées avec utilisation de microbilles plastiques déformables en substitution d'un adjuvant entraîneur d'air.

A5.2 Avantages

L'utilisation de microbilles plastiques déformables permet d'éviter les difficultés induites par l'utilisation d'adjuvants entraîneur d'air :

- difficultés de dosage de l'adjuvant,
- stabilité de la teneur en air,
- régularité des résistances en compression,
- baisse de résistance significative.

A5.3 Inconvénients

L'emploi de microbilles plastiques déformables ne bénéficie pas d'un retour d'expérience sur le long terme en France.

La répartition des microbilles dans le béton peut être hétérogène du fait de leurs modalités d'introduction et du type de malaxage. La teneur en bille doit donc être régulièrement contrôlée.

Du fait de leur faible densité, les microbilles peuvent avoir tendance à remonter et à s'accumuler en haut de coffrage. En l'absence de référence d'utilisation dans des conditions similaires (formulation, type de mise en œuvre, etc.), la réalisation de corps d'épreuves représentatifs est nécessaire pour valider ce point.

La validation passe par des essais de durabilité au gel interne, ce qui rallonge sensiblement la durée des épreuves d'études et de convenance pour les bétons G.

Impossibilité de réaliser un contrôle facile (du type facteur d'espacement) en phase chantier.

A5.4 Éléments justificatifs spécifiques à apporter pour obtenir l'approbation du maître d'œuvre

Dossier justifiant de l'homogénéité de la répartition des microbilles dans le béton (références, corps d'épreuves, etc.).

A5.5 Dispositions spécifiques

L'ensemble des exigences décrites dans les chapitres 3 à 10 des présentes recommandations s'applique, à l'exception des points suivants :

- exigences relatives à la formulation des bétons (tableau 8 du § 5.2) : possibilité d'utiliser des microbilles plastiques déformables en substitution de l'adjuvant entraîneur d'air,
- les exigences relatives à détermination du L_{barre} ne sont pas applicables,

- les exigences relatives au suivi de la teneur en air occlus du béton frais sont remplacées par le suivi de la teneur en microbilles plastiques déformables, tel que décrit ci-dessous,
- épreuve d'étude (§ 8.1.1) : remplacement du tableau 13 par le tableau 23,
- épreuve de convenance (§ 8.2) : remplacement du tableau 14 par le tableau 24,
- épreuve de contrôle (§ 8.3.2) : remplacement du tableau 17 par le tableau 25.

Les microbilles plastiques déformables rentrent dans la catégorie des ajouts.

En l'absence de référence d'utilisation dans des conditions analogues (formulation, type de mise en œuvre) ou en cas de doute sur la répartition des microbilles, un corps d'épreuve représentatif des modalités réelles de mise en œuvre doit être prévu au niveau de l'épreuve de convenance.

Les modalités suivantes doivent être décrites dans des procédures soumises à l'approbation du maître d'œuvre :

- modalités d'introduction des microbilles en centrale à béton,
- modalités de contrôle de la teneur en bille et de leur homogénéité.

Le contrôle de la teneur en microbilles sur béton frais doit faire l'objet d'une procédure soumise à l'approbation du maître d'œuvre.

Le principe de la méthode doit reposer sur une mesure en volume des microbilles incorporées au béton, après séparation des phases du béton frais. L'incertitude de mesure doit être compatible avec les gammes de teneur en microbilles attendues dans le béton frais.

Interprétation des épreuves d'étude et de convenance

Les paramètres B_1 et B_2 sont déterminés à l'issue des épreuves d'étude et de convenance selon une méthode analogue à celle développée dans l'annexe B4 pour les formulations avec un adjuvant entraîneur d'air (en remplaçant le L_{barre} par l'essai de gel interne adapté), avec :

- B_1 : valeur minimale de teneur en microbilles plastiques déformables associée à la conformité des essais de durabilité,
- B_2 : valeur maximale de teneur en microbilles plastiques déformables garantissant l'obtention des résistances en compression conformes.

L'écart entre les teneurs B_1 et B_2 est à justifier en fonction des conclusions du dossier relatif à l'homogénéité de la répartition des microbilles dans le béton et de la précision des moyens de dosage des microbilles en centrale à béton.

Interprétation des épreuves de contrôle

La teneur en microbilles doit être comprise dans l'intervalle $[B_1 ; B_2]$ déterminé à l'issue des épreuves d'étude et de convenance.

Tableau 23
Épreuve d'étude des bétons G et G + S formulés avec microbilles plastiques déformables

Partie de l'épreuve d'étude	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽³⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽⁴⁾	Teneur en billes du béton frais (%) ⁽⁵⁾	Essai de gel interne (% , µm/m) ⁽¹⁾⁽⁶⁾	Écaillage (g/m ²) ⁽²⁾⁽⁷⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁸⁾ et t_m⁽⁹⁾						
t	1	X	X	X		
t_m	1	X	X	X	X	X
t_m	2	X	X	X		
t_m	3	X	X	X		
Études des dérivées en microbilles [B₁, B₂]⁽¹⁰⁾ par rapport à la formule nominale, à t_i⁽⁸⁾						
B ₁	4	X	X	X	X	
B ₂	5	X	X	X		
Études des dérivées en eau par rapport à la formule nominale, à t_m⁽⁹⁾						
- 10 l d'eau ⁽¹¹⁾	6	X	X	X		
+ 10 l d'eau ⁽¹¹⁾	7	X	X	X	X	X

(1) Concerne les bétons G et G + S.

(2) Concerne les bétons G + S.

(3) selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.

(4) il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître assez tôt l'incidence éventuelle de l'incorporation des microbilles plastiques déformables sur les résistances mécaniques à 28 jours.

(5) Selon les modalités décrites dans les dispositions spécifiques.

(6) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a).

(7) Selon la norme XP P 18-420.

(8) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication d'une gâchée.

(9) En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes. Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués en béton, il est réduit à 30 minutes.

(10) L'étude de la sensibilité de la formule à la quantité de microbilles plastiques déformables consiste à faire varier la quantité de microbilles dans une plage [B₁, B_e, B₂]. L'écart entre B₁ et B₂ doit être compatible avec la dispersion attendue des teneurs en microbilles dans le béton et la précision des dispositifs de dosage des microbilles en centrale à béton. Les teneurs en billes doivent être telles que B₁ < B_e < B₂.

(11) L'ajustement porte sur l'eau efficace. Les valeurs de variation de la quantité d'eau peuvent être ramenées à ± 5 l si nécessaire, en fonction de la sensibilité de la formulation. C'est notamment le cas des bétons autoplaçant et des bétons à hautes performances. L'encadrement testé doit être compatible avec les ajustements d'eau qui seront réalisés au niveau de la centrale à béton.

Tableau 24

Épreuve de convenance des bétons G et G + S formulés avec des microbilles plastiques déformables

Partie de l'épreuve d'étude	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽³⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽⁴⁾	Teneur en billes du béton frais (%) ⁽⁵⁾	Essai de gel interne (% , $\mu\text{m/m}$) ⁽¹⁾⁽⁶⁾	Écaillage (g/m^2) ⁽²⁾⁽⁷⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁸⁾ et t_m⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾						
t_1	1 ⁽¹¹⁾	X		X		
t_2	2 ⁽¹¹⁾	X		X		
t_3	3 ⁽¹¹⁾	X		X		
t_m	1+2+3 ⁽¹¹⁾	X	X	X	X	X

(1) Concerne les bétons G et G + S.

(2) Concerne les bétons G + S.

(3) Selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.

(4) Il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître assez tôt l'incidence éventuelle de l'incorporation des microbilles plastiques déformables sur les résistances mécaniques à 28 jours.

(5) Selon les modalités décrites dans les dispositions spécifiques.

(6) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a).

(7) Selon la norme XP P 18-420.

(8) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication de la gâchée i.

(9) En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes à partir de t_i . Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués, il est réduit à 30 minutes.

(10) Il est recommandé de réaliser des mesures intermédiaires de consistance et de teneur en air toutes les 30 minutes entre t_3 et t_m afin d'évaluer la durée pratique d'utilisation si les seuils prescrits ne sont pas atteints à t_m .

(11) Après mise en mouvement de la cuve de la bétonnière à grande vitesse de rotation (supérieure à 12 tours par minute) pendant au moins 2 minutes.

Tableau 25
 Contrôle des bétons G et G + S formulés avec des billes plastiques déformables

Essais	Fréquences d'essais
Consistance Teneur en microbilles plastiques déformables	Une mesure sur les 3 premières charges de la journée, puis 1 toutes les 20 m ³ .
Essai de gel interne (pour les niveaux de prévention G et G + S) Écaillage (pour le niveau de prévention G + S)	Une mesure par fraction $\leq 1000 \text{ m}^3 + 1$ pour la première fraction de 1000 m ³ supplémentaire + 1 pour chaque fraction de 2000 m ³ supplémentaire, avec un minimum d'un essai tous les six mois ⁽¹⁾ .

(1) Les fractions supplémentaires ne donnent lieu à essai que si la production atteint 80 % de leur valeur (respectivement 400, 800 et 1600 m₃). Exemple : pour une production de 1200 m³ d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 2 déterminations du facteur d'espacement et 1 essai d'écaillage ; pour une production de 1850 m₃ d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 3 déterminations de facteur d'espacement et 2 essais d'écaillages.

Annexe A6

Dispositions relatives aux bétons projetés

Cette annexe décrit l'ensemble des dispositions applicables aux bétons projetés.

Les dispositions décrites dans les documents suivants s'appliquent :

- fascicules techniques de l'Asquapro,
- normes NF EN 14487-1, NF EN 14487-2 et NF P 95-102.

A6.1 Assurance qualité

L'ensemble des exigences du chapitre 3 s'appliquent.

A6.2 Constituants

Concernant les constituants, les dispositions du chapitre 4 des présentes recommandations s'appliquent, en complément des règles prescrites dans :

- les fascicules techniques de l'Asquapro,
- les normes NF EN 14487-1 et NF P 95-102.

En complément, les adjuvants spécifiques au domaine d'emploi des bétons projetés répondent aux exigences de la norme NF EN 934-5.

A6.3 Formulation des bétons

Les bétons projetés pourront être formulés sans adjuvant entraîneur d'air, leur résistance au gel ou sans sels étant vérifiée directement par essais de performance.

A6.4 Méthodes d'essais

Le comportement au gel ou sans sels d'un béton projeté est évalué en réalisant des caisses ajourées conformément à la norme NF EN 14488-1. Les corps d'épreuve sont prélevés dans ces caisses par sciage après réception. Ils sont ensuite conservés selon les modalités décrites dans les normes d'essais.

La caractérisation de la résistance au gel interne (niveau de prévention G et G + S) se fait sur la base d'essais de performance, selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425. Le choix de la norme d'essai se fera selon les dispositions du tableau 26.

Tableau 26
Détermination de la norme d'essai de gel interne à utiliser

		Types de gel	
		Faible ou modéré	Sévère
Saturation en eau	Faible	Non concerné	NF P 18-425
	Forte	NF P 18-425	NF P 18-424

Note - L'essai de détermination du facteur d'espacement des bulles d'air n'est généralement pas adapté à ce type de béton du fait de la grande difficulté à garantir un réseau de bulles d'air homogène après projection.

La résistance à l'écaillage (niveau de prévention G + S) est évaluée par l'essai décrit dans la norme XP P 18-420, réalisé sur la face sciée, au plus près de la surface.

Note - Dans le cas particulier du béton projeté, les irrégularités de surface rendent illusoire la possibilité de maintenir une couche de saumure d'épaisseur constante sur la face brute. Les essais d'écaillage seront donc réalisés sur la face sciée.

A6.5 Critères de conformités

Les critères de conformité des essais de durabilité sont prescrits dans les tableaux 27 et 28.

Note - Les critères relatifs à l'essai d'écaillage sont spécifiques aux bétons projetés.

Études et convenances

Tableau 27

Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels en épreuve d'étude et de convenance pour les bétons projetés

Essais	Mesures	G	G + S
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 400	≤ 400
	Rapport des carrés des fréquences de résonance" (%)	≥ 75	≥ 75
Essai d'écaillage	Écaillage (g/m^2)	Pas d'exigence	≤ 750

Contrôles

Tableau 28

Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels en épreuve de contrôle pour les bétons projetés

Essais	Mesures	G	G + S
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 500	≤ 500
	Rapport des carrés des fréquences de résonance" (%)	≥ 60	≥ 60
Essai d'écaillage	Écaillage (g/m^2)	Pas d'exigence	≤ 1000

Note - Les seuils utilisés en contrôle découlent de l'application d'un coefficient d'environ 1,2 par rapport aux seuils utilisés pour les épreuves d'étude et de convenance, afin de prendre en compte les hétérogénéités de fabrication en centrale à béton ou en usine de préfabrication.

A6.6 Épreuve d'étude

L'épreuve d'étude étant généralement réalisée en laboratoire et sans matériel de projection, les bétons projetés ne font pas l'objet, à ce stade, d'essais spécifiques pour évaluer leur aptitude à résister au gel avec ou sans sels. Des essais sont par contre prévus pendant les épreuves de convenance et de contrôle.

A6.7 Épreuve de convenance

Le programme de convenance complémentaire à appliquer pour prendre en compte les spécificités de la prévention au gel avec ou sans sels doit inclure :

- pour le niveau de prévention G : réalisation d'un essai de gel interne,
- pour le niveau de prévention G + S : réalisation d'un essai de gel interne et d'un essai d'écaillage.

Note - Étant donné la durée des essais spécifiques au gel-dégel, il peut être nécessaire d'anticiper une partie de l'épreuve de convenance. On rappelle, à toutes fins utiles, la durée des essais à réaliser :

- gel interne : 3,5 mois (bétons G),
- écaillage : 3 mois (bétons G et G + S).

A6.8 Épreuve de contrôle

Le plan de contrôle à appliquer pour prendre en compte les spécificités de la prévention au gel avec ou sans sels est celui défini dans le tableau 29.

Tableau 29

Plan de contrôle à appliquer à la mise en œuvre des bétons projetés

Essais	Fréquences d'essais
Essai de gel interne (pour les niveaux de prévention G et G + S)	Une mesure par fraction $\leq 1000 \text{ m}^3 + 1$ pour la première fraction de 1000 m^3 supplémentaire + 1 pour chaque fraction de 2000 m^3 supplémentaire, avec un minimum d'un essai tous les six mois ⁽¹⁾ .
Écaillage (pour le niveau de prévention G + S)	

(1) Les fractions supplémentaires ne donnent lieu à essai que si la production atteint 80 % de leur valeur (respectivement 800 et 1600 m^3). Exemple : pour une production de 1200 m^3 d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 1 essai de gel interne et 1 essai d'écaillage ; pour une production de 1850 m^3 d'un béton G + S en moins de 6 mois, on obtient 2 essai de gel interne et 2 essais d'écaillages.

Annexe B

Compléments techniques

- B1. Phénoménologie, mécanismes
- B2. Paramètres de classement des zones de rigueur hivernale et fréquence de salage
- B3. Tableau d'aide à la prescription des classes d'exposition
- B4. Compléments pour les formulations utilisant un adjuvant entraîneur d'air
- B5. Cas nécessitant la détermination du facteur d'espacement de référence
- B6. Principales caractéristiques des essais
- B7. Exemple de calculs, démarches

Annexe B1

Phénoménologie, mécanismes

Cette annexe constitue un complément au chapitre 1, qui présente les dégradations des bétons par le gel, avec ou sans sels de déverglaçage.

Il existe de nombreux modèles d'endommagement. Parmi ceux-ci, les deux suivants, plus prometteurs, sont développés dans la présente annexe :

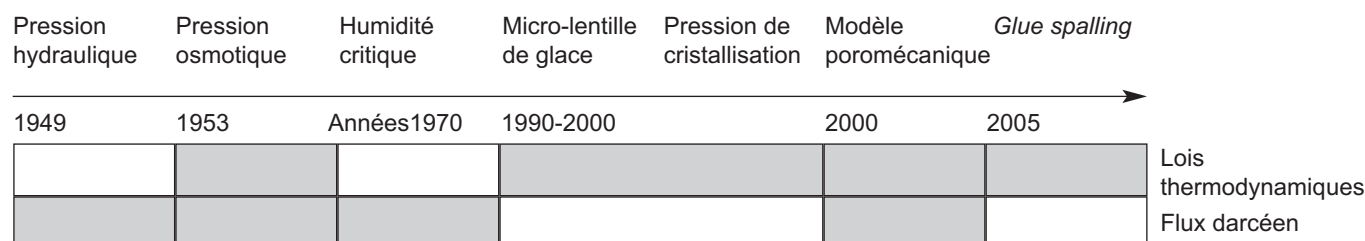
- le modèle basé sur la théorie des pressions hydrauliques (Powers, 1953), qui permet d'expliquer une part de la phénoménologie de la détérioration par gel interne,
- la théorie du *Glue spalling* (Valenza et Scherer, 2007), qui permet une modélisation de la détérioration par écaillage.

L'influence de certains paramètres présentés au chapitre 1 est également complétée par des résultats de recherche expérimentale qui expliquent certains phénomènes observés *in situ*.

B1.1 Compléments sur les modèles d'endommagement

Le modèle d'endommagement général communément admis pour expliquer le gel interne est la théorie des pressions hydrauliques (Powers, 1953). D'autres théories que celle de Powers ont été développées (figure 8) et ont permis de prendre en compte d'autres paramètres d'exposition et en particulier la présence de sels et d'expliciter certains éléments de phénoménologie.

Figure 8
Évolution de la modélisation de la détérioration de matériaux cimentaires adapté, d'après Qiang (2010)



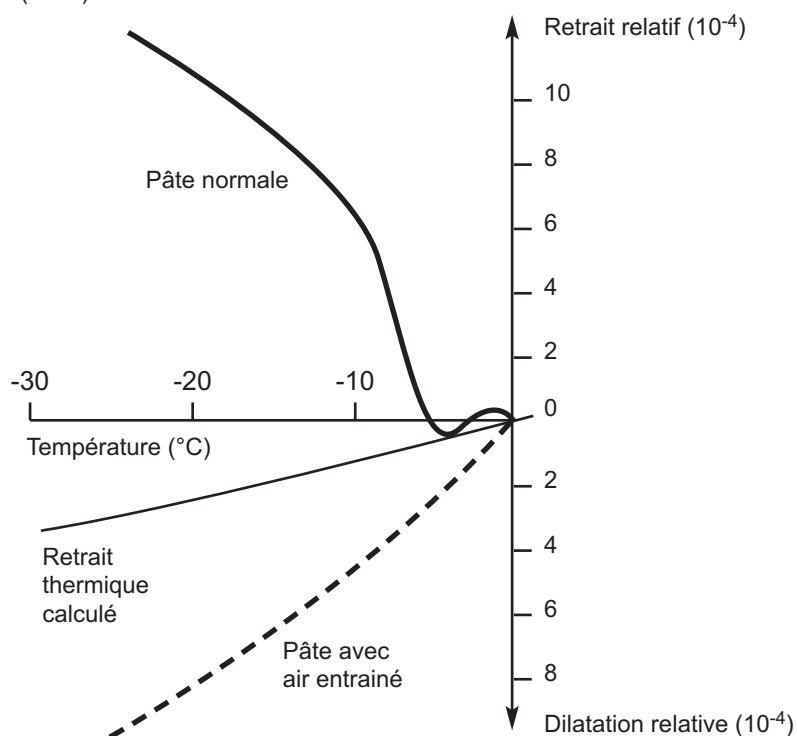
Le premier de ces modèles, établi par Powers, a permis d'obtenir des observations expérimentales cohérentes à l'échelle macroscopique et microscopique.

On retient en particulier que :

- la déformation thermique théorique calculée d'une éprouvette saturée soumise à un abaissement de température ne se vérifie pas expérimentalement : l'éprouvette se contracte plus fortement lorsque le matériau contient un réseau de bulles d'air entraînées ou se dilate plus fortement en l'absence de vide d'air dans le matériau (figure 9),
- plus récemment, le phénomène d'expulsion d'eau à température négative avec cristallisation dans les vides d'air a été expérimentalement photographié à l'aide d'un microscope électronique à balayage environnemental (Corr *et al.*, 2002).

Ce mécanisme permet également d'expliquer l'existence d'un seuil de saturation en dessous duquel les capillaires ne contenant pas d'eau constituent un volume tampon pour l'expansion de l'eau sous pression.

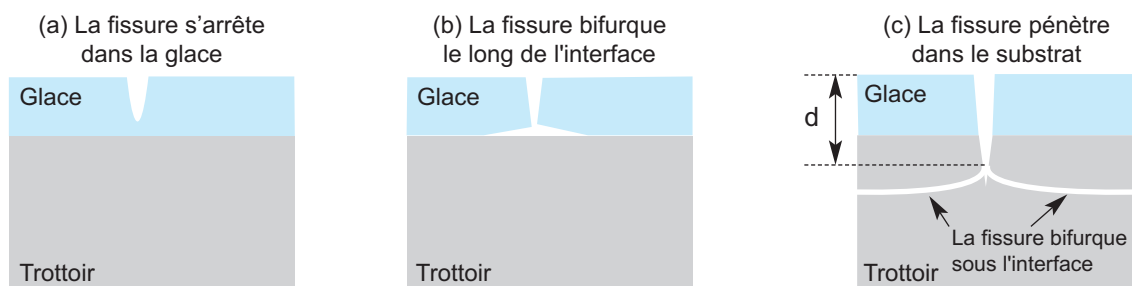
Figure 9
Déformation d'une pâte cimentaire saturée au cours du gel et influence du réseau d'air entraîné, d'après Powers (1953)



L'écaillage en présence de sels de déverglaçage est une détérioration de surface. Le béton exposé à des cycles de gel dégel peut également présenter une dégradation par gel interne ou d'autres pathologies liées à la pénétration des sels dans le matériau. La dissociation phénoménologique des mécanismes à l'origine de la détérioration du béton est difficile. La majorité des propositions de mécanismes fondamentaux est basée sur le comportement à cœur du béton : pressions hydrauliques, réseau d'air entraîné, concentration en sels dans le réseau poreux, etc. La part d'influence directe, pourtant indiscutable, de la solution en surface a été négligée dans tous les mécanismes de détérioration par écaillage jusqu'à la théorie du *Glue spalling* (Valenza et Scherer, 2007).

Cette théorie repose sur l'adhérence d'interface entre la glace et la surface du béton. Les inclusions de saumure liquide contenues dans la glace et la différence de dilatation thermique entre la glace et le béton expliquent les tensions à l'origine de fissures dans la glace. Leur transmission à la peau du béton est à l'origine de la formation des écailles tel que décrit dans le détail c) de la figure 10.

Figure 10
Cas possibles de propagation d'une fissure dans la glace (a) arrêt dans la glace, (b) bifurcation à l'interface ou (c) bifurcation dans la peau du béton, adapté d'après Valenza et Scherer (2006)



Ce modèle corrèle les principaux paramètres expérimentaux influençant les résultats d'écaillage et en particulier l'effet pessimum d'écaillage. Ce modèle est récent et fait encore objet de discussion dans la communauté scientifique.

B1.2 Surface exposée

La surface coffrée ou libre d'un béton présente des propriétés différentes de celle du même béton prélevé dans la masse. Ces différences de propriétés sont, d'une part, induites par une répartition différente des constituants lorsqu'on se rapproche de la surface du béton, en particulier la diminution de la proportion de grosse fraction granulaire et l'augmentation relative de la quantité de pâte. D'autre part, l'hydratation du béton est complexe car la surface est un passage obligé pour les échanges et transferts vers le cœur du matériau.

L'exposition aérienne à certains agents extérieur (tels que le CO_2) peut favoriser l'évolution chimique du matériau (carbonatation en particulier).

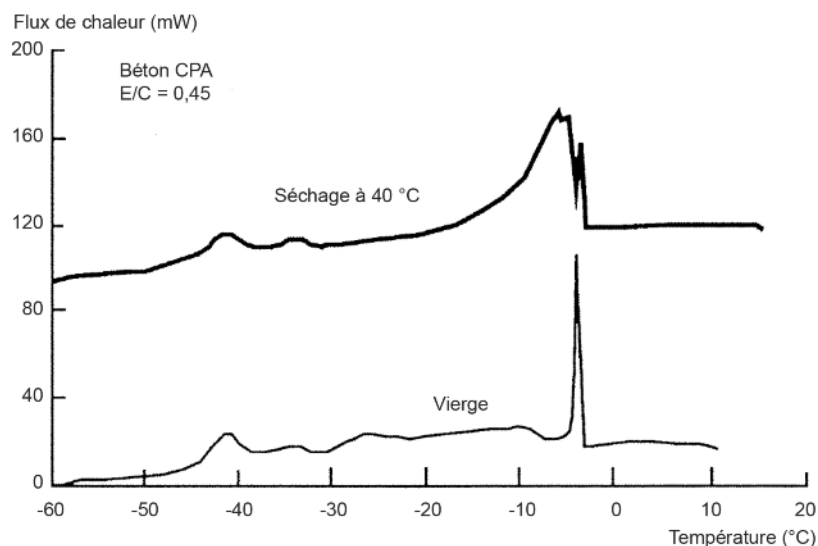
L'exposition naturelle à des cycles de séchage saturation modifie fortement les propriétés de la pâte cimentaire. Un seul cycle de séchage à $40\text{ }^\circ\text{C}$ sur un corps d'épreuve provoque une augmentation de la porosité ce qui est constaté par les mesures calorifiques comparées de la quantité d'eau gelable dans un béton (figure 11).

Par ailleurs, certains coffrages peuvent influencer sur les propriétés de la surface exposée.

Ainsi, la cure, l'évaporation, le séchage et la fissuration influent sur les propriétés de la surface exposée et donc sur la résistance du béton soumis à l'écaillage.

Figure 11

Effet du séchage sur la quantité d'eau gelable dans un béton traditionnel (Marchand, 1993)



B1.3 Sels de déverglaçage

La présence extérieure de sels de déverglaçage lors de l'exposition à des cycles de gel est considérée comme un facteur aggravant pour la détérioration du béton.

Par exemple, après avoir pénétré dans le milieu poreux, la présence de sels induit un abaissement de la pression de vapeur saturante et une augmentation du degré de saturation, ce qui accroît la sensibilité au gel interne. Cet aspect délétère est indépendant

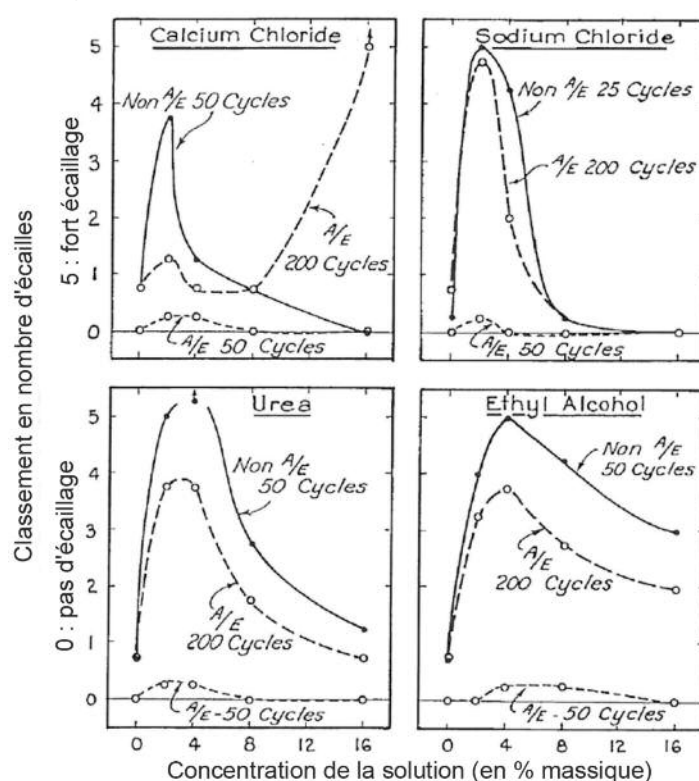
de l'écaillage pour lequel de nombreuses campagnes expérimentales ont montré que seule la concentration des sels dans la solution extérieure influence la phénoménologie de la détérioration (Marchand, 1993).

Par ailleurs, on n'observe pas de proportionnalité entre la quantité de sels contenue dans la solution à la surface d'un béton et l'écaillage. Il existe un effet pessimum de dégradation pour des dosages de sels autour de 3 % à 5 % en masse.

D'autres espèces chimiques non cristallisantes et en particulier des alcools (généralement du glycol) utilisés sur les pistes aéroportuaires conduisent aux mêmes résultats (figure 12).

Figure 12

Mise en évidence de l'effet pessimum dans un béton avec ou sans agent entraîneur d'air (A/E)
(Verberck et Klieger, 1957)



Les propriétés thermodynamiques de la lame d'eau et des sels à la surface du béton exposé jouent un rôle majeur dans la formation de la glace au-dessus de la surface exposée et donc ensuite sur l'écaillage. Les propriétés mécaniques de la glace ainsi formée au-dessus de la surface exposée sont dépendantes du dosage en sel, mais également d'autres paramètres comme l'épaisseur de la lame de solution au-dessus de la surface et les caractéristiques des cycles de gel : nombre et durée des cycles, taux de refroidissement, température inférieure, etc.

B1.4 Granulats

Les roches sont des géomatériaux qui présentent de nombreuses analogies avec les bétons, y compris dans leur comportement face à l'exposition à des cycles de gel-dégel. Cette analogie existe également lors d'une exposition en présence de sels avec l'observation d'un effet *pessimum* (Wessman, 1997 : sur prismes de roche calcaire immergés dans une solution contenant de 0 à 4 % de NaCl, après 4 cycles de gel-dégel)

Les granulats de la formule d'un béton sont généralement sélectionnés à l'aide d'indicateurs et en particulier un essai d'absorption selon la norme NF EN 1097-6 pour les coupures d'un diamètre supérieur à 4 mm. Ces indicateurs sont des conditions nécessaires mais pas toujours suffisantes pour assurer une bonne résistance à l'écaillage tel qu'illustré par la figure 13 qui montre un biais du résultat d'essai par la détérioration de granulats proches de la surface. Pour autant, la coupure 11,2/22,4 entrant dans la composition du béton respectait une friabilité inférieure à 1 % lors de la réalisation de l'essai selon la norme NF EN 1376-1. Il faut noter que les essais de performance de la série la norme NF EN 1376 sont moins « sévères » que les essais de gel interne et d'écaillage avec une exposition à 10 cycles de gel-dégel et une température minimale de -17,5 °C.

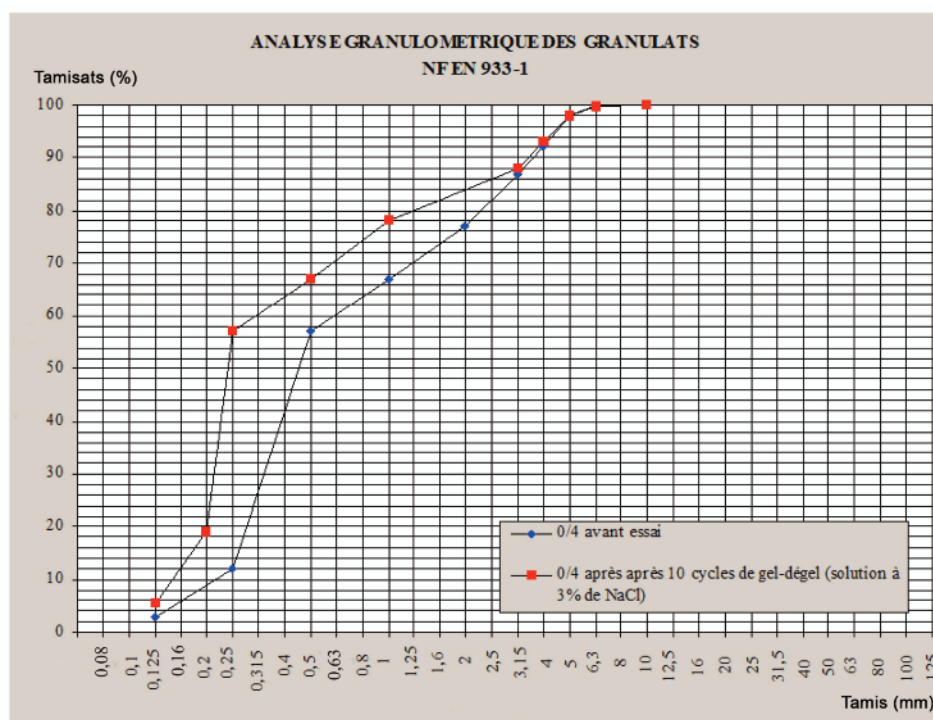
En revanche, il n'existe pas d'essai de performance pour qualifier la résistance au gel des sables. Les coupures granulaires 0/4 mm ne sont pourtant pas insensibles à une exposition au gel en présence de sel. Une analyse granulométrique comparée avant et après réalisation de l'essai selon la norme NF EN 1376-6 dont la concentration en NaCl avait été portée de 1 à 3 % a permis de mettre en évidence un fractionnement de sables silico-calcaires semi-concassés 0/4 mm (figure 14). De plus, l'influence des sables lors d'un essai d'écaillage est difficilement identifiable et la recherche expérimentale apporte pas ou peu d'information sur ce sujet

Ainsi, les indicateurs couramment utilisés pour sélectionner les granulats sont généralement efficaces mais une influence des granulats sur la résistance au gel en présence de sel ou non reste possible.

Figure 13 – Poursuite de l'essai d'écaillage jusqu'à 302 cycles afin de mettre en évidence le biais généré par la détérioration d'un granulat proche de la surface (Bouteille, 2013)



Figure 14 - Évolution de la granulométrie d'un sable 0/4 silico-calcaire semi-concassé après 10 cycles de gel-dégel dans une solution à 3 % de NaCl (Bouteille, 2013)



B1.5 Éléments de synthèse

Ce paragraphe synthétise les éléments notables du chapitre 1 et de la présente annexe. Il se limite aux modèles d'endommagement et aux paramètres d'influence.

Les modèles d'endommagement présentés dans ce guide sont relatifs à l'un des deux modes de détérioration identifiés : le gel interne ou l'écaillage. Ces modèles permettent d'expliquer tout ou partie des observations expérimentales mais ne sont pas prédictifs.

Parmi les paramètres d'influence des deux modes de détériorations on identifie d'une part les paramètres d'exposition et d'autre part les propriétés intrinsèques du béton dont certaines sont également dépendantes des conditions environnementales.

Les paramètres d'exposition environnementale sont essentiellement constitués par :

- le nombre de cycle de gel-dégel et les caractéristiques principales de ce dernier : le taux de refroidissement, la température minimale et la durée du palier à la température minimale,
- la présence de sel de déverglaçage est un paramètre d'influence du premier ordre pour l'écaillage lorsqu'il est contenu dans une lame d'eau positionnée au-dessus de la surface exposée. Une fois que les sels de déverglaçage ont pénétré dans le réseau poreux du béton, leur présence est un facteur aggravant pour le gel interne, mais n'influe pas sur l'écaillage.

Les caractéristiques et propriétés intrinsèques du béton sont des paramètres influents sur la durabilité du matériau face à ce type d'exposition. On note en particulier que :

- la constitution d'un réseau de bulle d'air au sein du béton est un élément protecteur vis-à-vis du gel interne,
- les constituants du ciment doivent-êtré sélectionnés pour éviter des endommagements prématurés,

- les granulats doivent être résistants au gel et peuvent présenter une sensibilité à l'écaillage,
- la durabilité diminue avec l'élévation du rapport $E_{eff}/Liant_{eq}$,
- la mise en œuvre du béton : d'une part le malaxage, le transport, les mises en place spécifiques par exemple par pompage influent sur la constitution et la stabilité du réseau de bulle d'air entraîné lorsque ce dernier est requis, et d'autre part le coffrage, la cure et la finition de surface peuvent modifier les propriétés de paroi du béton,
- un faible délai de maturation et la possible exposition à des alternances d'humidification et de séchage avant exposition à des cycles de gel-dégel peuvent diminuer la durabilité d'un béton au gel interne et à l'écaillage.

Annexe B2

Paramètres de classement des zones de rigueur hivernale et fréquence de salage

Le guide pratique « Aide à l'élaboration des DOVH » de 1994 définit la rigueur moyenne de l'hiver sur un territoire donné selon la directive du 4 septembre 1978, comme étant une grandeur déduite de la somme des trois termes suivants :

- J1, le nombre moyen annuel de jours au cours desquels est constatée une chute de neige suffisante pour blanchir une chaussée,
- J2, le nombre moyen annuel de jours au cours desquels est constatée l'apparition de verglas sous précipitations (pluie sur sol gelé, pluie en surfusion) sauf ceux comptabilisés en J1,
- J3, le nombre moyen annuel de jours au cours desquels est constatée l'apparition de verglas hors précipitations (givre, congélation d'humidité préexistante même consécutive à une précipitation, dépôt de brouillard givrant) sauf ceux comptabilisés en J2.

La rigueur moyenne de l'hiver H_i est alors définie de la manière suivante :

	$J1 + J2 + J3 \leq 10$	H1 : zone à hiver clément
10 <	$J1 + J2 + J3 \leq 30$	H2 : zone à hiver peu rigoureux
30 <	$J1 + J2 + J3 \leq 50$	H3 : zone à hiver assez rigoureux
50 <	$J1 + J2 + J3 \leq 90$	H4 : zone à hiver rigoureux
90 <	$J1 + J2 + J3$	H5 : zone à hiver extrêmement rigoureux

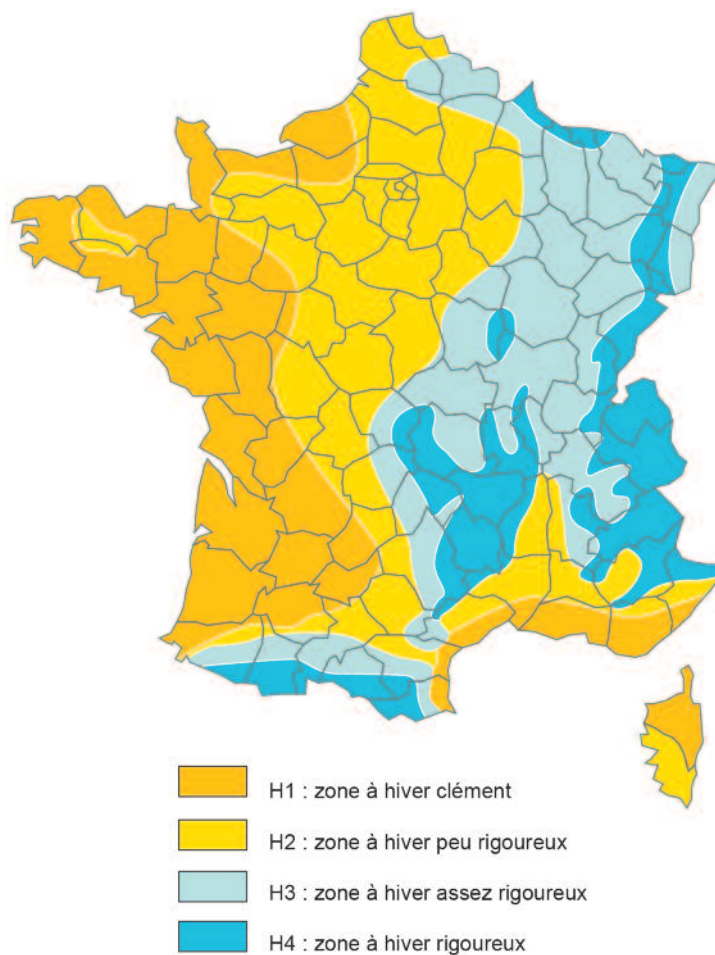
Malgré l'imperfection de ces définitions, leur utilisation depuis de nombreuses années nous encourage à les reconduire telles quelles. La carte de la figure 15 présente la répartition territoriale des H_i .

Note - Le guide méthodologique « Viabilité hivernale, approche globale » Sétra 2009, utilise l'Index de viabilité hivernale IVH. Ce paramètre, différent du H_i , est le résultat d'une combinaison pondérée de critères atmosphériques selon un algorithme défini et corrélé à l'activité hivernale. Un IVH par département est consultable sur le site <http://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/>. Il est calculé pour la station départementale du réseau principal de Météo France. À la date de rédaction du guide, les fiches « station météo » comportent un tableau récapitulatif des séries de valeurs 1977-2018. 5 zones climatiques (IVHi) homogènes de rigueur hivernale croissante, IVH1 à IVH5 sont alors considérées. Les valeurs d'IVH constituant la limite des IVHi et la prise en compte de la fréquence de salage associée sont définies dans le tableau 30.

Tableau 30
Établissement de la fréquence de salage à l'aide des IVHi

IVHi	Zone climatique	Fréquence de salage
$IVH1 \leq 15$	Hiver clément	Salage peu fréquent
$15 < IVH2 \leq 25$	Hiver peu rigoureux	Salage fréquent
$25 < IVH3 \leq 35$	Hiver assez rigoureux	Salage très fréquent
$35 < IVH4 \leq 45$	Hiver rigoureux	Salage très fréquent
$45 < IVH5$	Hiver extrêmement rigoureux	Salage très fréquent

Figure 15
Carte des Hi, permettant d'estimer la fréquence de salage



Annexe B3

Tableau d'aide à la prescription des classes d'exposition

Suite à l'évolution de la définition de l'exposition des parties d'ouvrage au risque d'écaillage, les tableaux d'aide à la prescription des classes d'exposition proposés par l'École française du béton ne sont plus directement applicables pour les classes d'exposition XF2 et XF4.

Le tableau 31 constitue une aide à la prescription des classes d'exposition XF1 à XF4 applicable au cas des ouvrages d'art en béton. Il a été conçu en application des dispositions du § 2.3 des présentes recommandations et se substitue au tableau proposé par l'EFB (EFB, 2010).

Ce tableau ne traite que du cas général. Dans tous les cas, une analyse fine de l'exposition de l'ouvrage est à mener pour apprécier au mieux les risques, en tenant compte notamment de la politique prévisionnelle d'exploitation et d'entretien.

Conformément aux dispositions du fascicule 65 du CCTG travaux, une distinction a été opérée entre parties d'ouvrages exposées aux sels (risque de corrosion : parties d'ouvrages situées à moins de 6 m verticalement et horizontalement d'une voie salée) et parties d'ouvrages très exposées au risque d'écaillage. En gel modéré avec un salage très fréquent, le choix a ainsi été fait de privilégier le risque de corrosion par rapport au risque d'écaillage dans le cas de parties d'ouvrages qui ne sont pas très exposées au risque d'écaillage (parties d'ouvrages verticales, intrados, etc.). Il en résulte que ces parties d'ouvrages sont traitées avec une classe d'exposition XF2 (au lieu de XF4).

Pour ce qui concerne les dalles de transition en gel modéré avec salage très fréquent, il a été considéré que l'épaisseur de matériau au-dessus de la dalle conférerait une protection relative vis-à-vis des cycles de gel-dégel et que la corrosion des armatures constituait en conséquence le risque principal. D'où le classement en XF2 (au lieu de XF4).

Légendes associées aux symboles du tableau 31 des pages suivantes (90 et 91)

H est la profondeur de gel calculée selon NF P 94-261

(**) Conditions d'expositions valables tant que le joint de chaussée remplit sa fonction d'étanchéité. Peut éventuellement être surclassé en fonction de la politique d'entretien.

(****) La distinction des parties aériennes des fondations superficielles non immergées et des parties faiblement enterrées relève d'une appréciation du risque par le maître d'ouvrage. Les indications fournies dans ce tableau ne constituent qu'une aide à la décision.

(*****) L'attention est attirée sur le fait que l'utilisation d'adjuvant entraîneur d'air dans des bétons de fondation profonde peut conduire à l'apparition de désordres importants en cas d'instabilité du réseau de bulles d'air.

Grisé : non concerné ou non applicable

Tableau 31
Tableau d'aide à la prescription des classes d'exposition

Partie d'ouvrage		Exposition de la partie d'ouvrage		
		Exposition au gel	Saturation en eau	Exposition aux sels
Fondations (****)	Fondations de tous types, entièrement immergées (eau douce)	Non	Forte	Non
	Fondations de tous types en zone de marnage ou faiblement immergées (eau douce)	Oui	Forte	Non
	Fondations profondes enterrées hors eau de mer	Non	Faible ou forte	Non
	Fondations superficielles non immergées (partie aérienne) (****)	Oui	Faible ou forte	Non
		Oui	Forte	Oui
	Fondations superficielles non immergées et enterrée de moins de H m (*) (****)	Oui	Faible ou forte Faible ou forte	Non Oui
Fondations superficielles non immergées et enterrée de plus de H m (*)	Non	Faible	Non	
Appuis	Appui - partie aérienne - chevêtre ou sommier sous joint de chaussée	Oui	Faible(**)	Non(**)
	Appui - partie aérienne ou enterrée de moins de H m (*) - chevêtre ou sommier sans joint de chaussée au dessus, pile, piédroits et murs en retour ou en aile de cadre ou portique	Oui	Faible	Non
		Oui	Faible	Oui
	Appui - partie immergée (eau douce)	Oui	Forte	Non
	Appui - partie en zone de marnage	Oui	Forte	Non
Tablier	Tablier - hourdis, poutres, dalles, traverses de ponts-cadres, caissons entretoises - face protégée par l'étanchéité ou face intérieure de caisson	Oui	Faible	Non
	Tablier - hourdis, poutres, dalles, traverses de ponts-cadres, caissons entretoises - face extérieure	Oui	Faible	Non
		Oui	Faible	Oui
Équipements	Équipements - dalle de transition	Oui	Faible	Oui
	Équipements - solin de joint de chaussée, corniches, contre-corniche, corniches-caniveau, longrines d'ancrage de barrière de sécurité	Oui	Forte	Oui
	Équipements - barrière de sécurité en béton, gardes-corps, écrans acoustiques	Oui	Faible	Oui
	Équipements - massifs d'ancrage de PPHM, de candélabres ou de panneaux de signalisation	Oui	Forte	Oui

Gel faible ou modéré						Gel sévère					
Salage voie portée			Salage voie franchise			Salage voie portée			Salage voie franchise		
Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent	Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent	Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent	Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
			XF1	XF2(***)	XF4				XF3	XF4	XF4
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
			XF1	XF2	XF2				XF3	XF4	XF4
XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3			
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
			XF1	XF2	XF2				XF3	XF4	XF4
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3			
			XF1	XF1	XF1				XF3	XF3	XF3
			XF1	XF2	XF2				XF3	XF4	XF4
XF1	XF2	XF2				XF3	XF4	XF4			
XF1	XF2(***)	XF4				XF3	XF4	XF4			
XF1	XF2	XF2	XF1	XF2	XF2	XF3	XF4	XF4	XF3	XF4	XF4
XF1	XF2(***)	XF4	XF1	XF2(***)	XF4	XF3	XF4	XF4	XF3	XF4	XF4

Annexe B4

Compléments pour les formulations utilisant un adjuvant entraîneur d'air

L'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air constitue la méthode la plus utilisée pour rendre un béton résistant au gel interne. Le principe consiste à maintenir la teneur en air dans une plage de valeurs associées à des valeurs de facteur d'espacement et de résistance en compression conformes.

L'étude de sensibilité (réalisée pendant l'épreuve d'étude) consiste à faire varier la teneur en air du béton dans une plage $[A_e - x, A_e + y]$ incluant la valeur A_e associée à la formule nominale, en faisant varier le dosage en adjuvant entraîneur d'air de $\pm z$ % autour de la teneur en adjuvant de la formule nominale.

Note - x et y sont usuellement de l'ordre de 2 %.

Note - Des exemples d'application numérique sont fournis en annexe B7.

À chaque valeur de dosage en adjuvant entraîneur d'air sont mesurées :

- la teneur en air occlus du béton frais,
- la valeur du facteur d'espacement des bulles d'air,
- la résistance en compression.

Le principe de validation est illustré sur les figures 16 (pour l'exigence sur le L_{barre}) et 17 (pour l'exigence sur la résistance en compression), dans le cas particulier d'un béton G, avec :

- A_e : teneur en air occlus obtenue sur la formule nominale pendant l'épreuve d'étude,
- $A_e - x$: valeur minimale testée de la teneur en air,
- $A_e + y$: valeur maximale testée de la teneur en air,
- A_L : teneur en air occlus minimale permettant de garantir la résistance au gel du béton, selon le type de composition, sur la base d'un essai de performance selon les normes NF P 18-424 / NF P 18-425 ou de la détermination du facteur d'espacement au niveau des épreuves d'étude et de convenance, en prenant en compte une marge de sécurité,
- B_C : teneur en air occlus maximale garantissant l'obtention d'une valeur de résistance en compression conforme au niveau des épreuves d'étude et de convenance.

Note - A_L et B_C sont classiquement arrondis à 0,5 point de pourcent près.

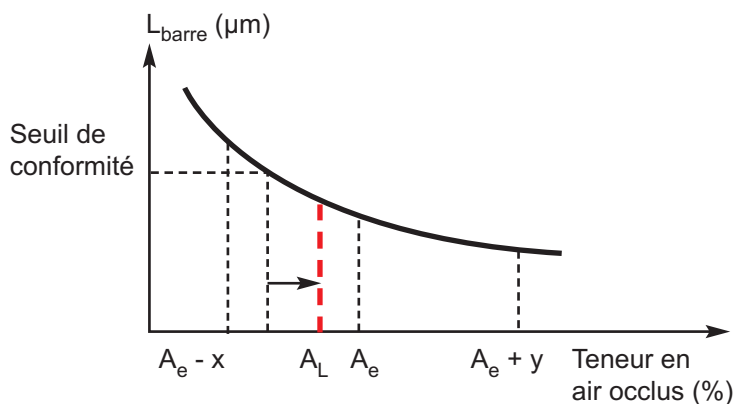
Note - Même s'il est théoriquement possible de prendre pour A_L la valeur de teneur en air associée au seuil de conformité, il est recommandé de prendre une marge de sécurité de l'ordre de 10 μm , matérialisée par la flèche noire sur la figure 16.

Note - Il n'y a pas de nécessité de réaliser une interpolation linéaire dans le cas où la valeur de L_{barre} associée à $A_e - x$ est inférieure à celle du seuil de conformité. On a alors dans ce cas $A_L = A_e - x$.

Note - La valeur de L_{barre} maximale à considérer est de 250 μm pour un béton G et 200 μm pour un béton G + S (cf. § 7.4).

Figure 16

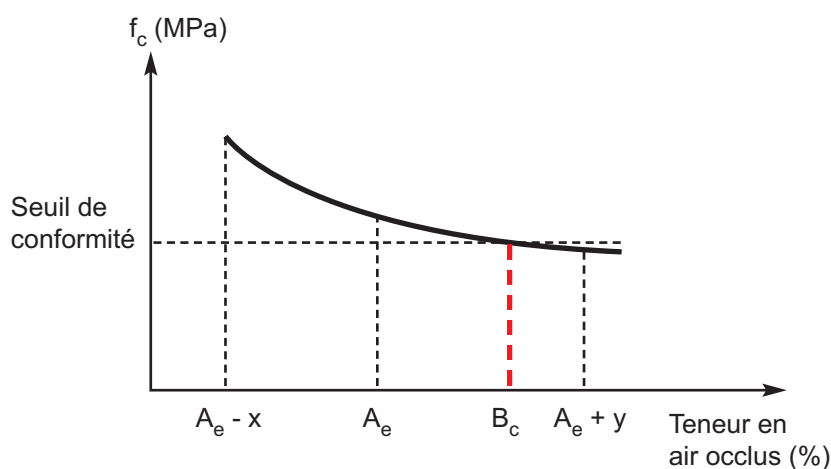
Exemple de détermination de la plage de teneur en air occlus acceptable du point de vue de la résistance au gel interne, en épreuve d'étude, dans le cas d'un béton G (la flèche noire représente la marge de sécurité prise en compte)



Les résultats d'essais doivent présenter une évolution compatible avec la décroissance des courbes L_{barre} (respectivement f_c) = fct (teneur en air), tel que représenté sur les figures 16 et 17.

Figure 17

Exemple de détermination de la plage de teneur en air occlus acceptable du point de vue de la résistance en compression, en épreuve d'étude, dans le cas d'un béton G



Note - Il n'est en général pas nécessaire de prendre une marge de sécurité supplémentaire pour la détermination de B_C , celle-ci étant gérée par les règles de définition de la conformité des résistances en compression en étude et convenance.

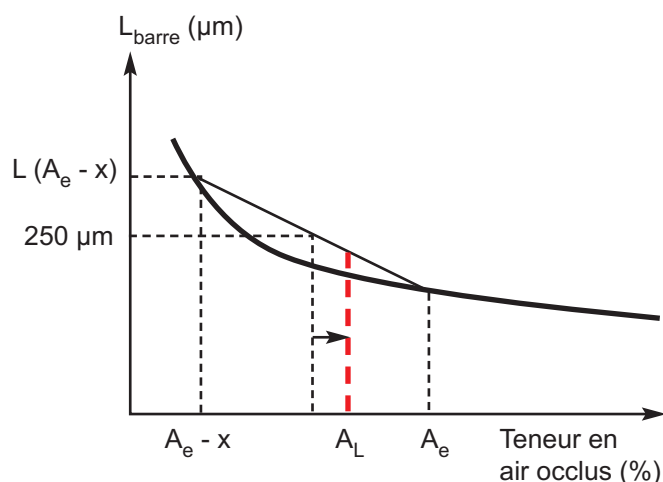
Note - Il n'y a pas de nécessité de réaliser une interpolation linéaire dans le cas où la valeur de résistance en compression associée à $A_e + y$ est supérieure au seuil de conformité. On a alors dans ce cas $B_C = A_e + y$.

$[A_L \text{ et } B_C]$ est compris dans un intervalle $[A_e - x ; A_e + y]$. La gamme de dosage en adjuvant entraîneur d'air permettant d'obtenir l'intervalle $[A_L ; B_C]$ sur la teneur en air doit être compatible avec l'incertitude des dispositifs de dosage utilisés sur la centrale à béton.

Compte tenu de la forme de la courbe L_{barre} en fonction de la teneur en air, la valeur de A_L peut être obtenue de façon sécuritaire en calculant par interpolation linéaire (figure 18) la teneur en air associée au seuil de conformité du facteur d'espacement à partir des valeurs de A_e et $A_e - x$.

Figure 18

Exemple d'interpolation linéaire pour déterminer la plage de teneur en air occlus acceptable du point de vue de la résistance au gel interne, en épreuve d'étude, dans le cas d'un béton G (la flèche noire représente la marge de sécurité prise en compte)



Note - Pour B_C , cette interpolation n'est réalisable entre A_e et $A_e + y$ que si la résistance évolue en première approche de manière linéaire par rapport à la teneur en air occlus. Dans le cas contraire, le calcul n'est pas sécuritaire. Le valeur de résistance en compression associée à $A_e + y$ doit alors se situer dans la plage de conformité pour pouvoir être exploitée.

Note - Si la valeur de $L(A_e - x)$ est supérieure à $250 \mu\text{m}$ pour un béton G (respectivement $200 \mu\text{m}$ pour un béton G + S), et donc trop éloignée de la valeur seuil pour réaliser une interpolation fiable, il est souhaitable de refaire une formule dérivée.

Note - La valeur de A_L peut être inférieure à 4 % puisqu'elle est basée sur la détermination du facteur d'espacement, grandeur corrélée au résultat de l'essai de gel interne.

Les valeurs de teneur en air occlus lors du contrôle à réception devront être comprises dans l'intervalle : $[A_L - 0,5 ; \min(B_C ; A_L + 5,0)]$.

Note - L'amplitude des teneurs en air acceptables doit être compatible avec le niveau de régularité que peut garantir le producteur.

Note - Les terme « - 0,5 » et « + 5,0 » découlent des exigences de la norme NF EN 206/CN sur la conformité des teneurs en air des bétons pour lesquels la teneur en air occlus est spécifiée. Des exemples d'application sont fournis dans l'annexe B7.3.

Annexe B5

Cas nécessitant la détermination d'un facteur d'espacement de référence

B5.1 Méthode de validation

La méthode de validation de la résistance au gel interne passe par la détermination en épreuve d'étude du facteur d'espacement de référence du béton au moyen d'essais de performance en enceinte climatique.

Note - Cette démarche permet de réaliser des contrôles en cours de chantier sur la base du facteur d'espacement, au lieu de réaliser des essais en enceinte climatique, plus longs et plus coûteux.

La détermination du facteur d'espacement de référence est réalisée pendant l'épreuve d'étude de la manière suivante :

- réalisation de l'essai de performance de gel interne (selon le cas, selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425) sur la formule dérivée avec moins d'air ;
- détermination du facteur d'espacement des bulles d'air (selon la norme ASTM C457-98) sur la formule nominale et sur la dérivée avec moins d'air.

Note - En pratique, le laboratoire aura intérêt à tester des couples gel interne / facteur d'espacement sur plusieurs formulations différant par leur teneur en air. Il n'est cependant pas indispensable de construire les courbes complètes $(f_r/f_0)^2 = \text{fct}(L_{\text{barre}})$ et $L_{\text{barre}} = \text{fct}(\text{teneur en air})$.

Le facteur d'espacement de référence correspond alors à la valeur obtenue sur la formule dérivée avec moins d'air permettant de valider le critère de conformité sur la chute de fréquence de résonance.

Note - Le principe de détermination du facteur d'espacement de référence repose sur le fait que, toutes choses égales par ailleurs, la résistance au gel interne augmente si le facteur d'espacement diminue. Il suffit donc de caractériser la résistance au gel interne sur la dérivée avec moins d'air pour s'assurer que la formule nominale résiste au gel interne (figure 19).

Le principe d'obtention du facteur d'espacement de référence est présenté dans les figures 19 et 20.

Figure 19

Lien entre le facteur d'espacement de référence et la résistance au gel interne

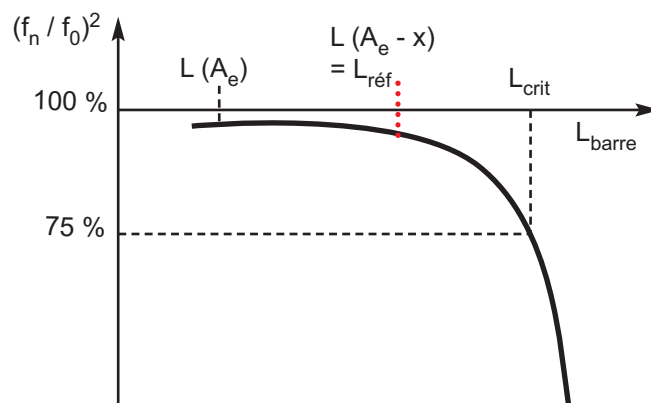
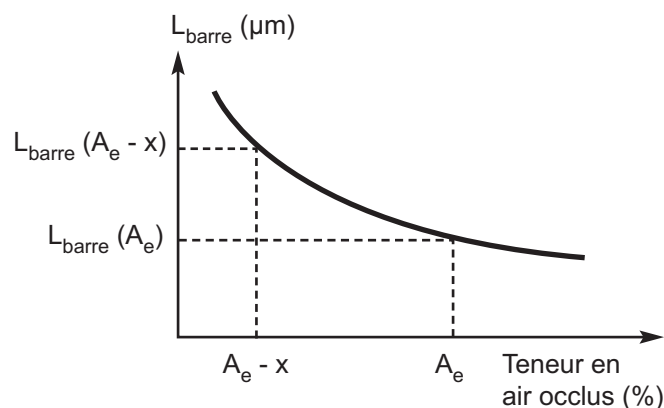


Figure 20

Lien entre le facteur d'espacement de référence et la teneur en air occlus



Avec :

 A_e : la teneur en air occlus mesurée sur la formule nominale, $A_e - x$: valeur minimale testée de la teneur en air (dérivée avec moins d'air), L_{crit} : facteur d'espacement critique, $L_{\text{réf}}$: facteur d'espacement de référence, $L_{\text{barre}}(z)$: facteur d'espacement associé à une teneur en air occlus z .

B5.2 Critères de conformité

Pour la résistance en compression et la teneur en air occlus, les dispositions décrites dans le § 7 s'appliquent.

Pour les essais de gel interne et de détermination du facteur d'espacement, les critères de conformité à appliquer sont ceux définis dans les tableaux 32 (épreuve d'étude), 33 (épreuve de convenance) et 34 (épreuve de contrôle).

Tableau 32

Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels en épreuve d'étude

Essai	Mesures	G
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 400
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 75

Le facteur d'espacement de référence ($L_{\text{réf}}$) est obtenu au cours de l'épreuve d'étude.

Tableau 33

Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels en épreuve de convenance

Essais	Mesures	G
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 400
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 75
Alternative à l'essai de gel interne	Facteur d'espacement (μm)	$\leq L_{\text{réf}}$

Tableau 34
Critères de conformité vis-à-vis de la durabilité au gel avec ou sans sels en épreuve de contrôle

Essais	Mesures	G
Essai de gel interne	Allongement relatif ($\mu\text{m}/\text{m}$)	≤ 500
	Rapport des carrés des fréquences de résonance (%)	≥ 60
Alternative à l'essai de gel interne	Facteur d'espacement (μm)	$\leq L_{\text{réf}}$

Note - Il n'est pas possible de prendre une marge sur le facteur d'espacement entre les épreuves d'étude et de contrôle du fait que l'on ignore l'écart qu'il y a entre le $L_{\text{réf}}$ et le L_{crit}

Note - Les seuils utilisés en contrôle découlent de l'application d'un coefficient d'environ 1,2 par rapport aux seuils utilisés pour les épreuves d'étude et de convenance, afin de prendre en compte les hétérogénéités de fabrication en centrale à béton ou en usine de préfabrication.

B5.3 Épreuves

Les épreuves sont conduites selon les dispositions décrites dans le § 8, à l'exception du contenu des épreuves d'études, décrit dans le tableau 35.

Tableau 35
Épreuve d'étude des bétons G

					Résistance au gel interne	
Partie de l'épreuve d'étude	N° des gâchées	Consistance (mm) ⁽¹⁾	Résistance en compression à 28 j (MPa) ⁽²⁾	Teneur en air occlus du béton frais (%) ⁽³⁾	Essai de gel interne (% , $\mu\text{m}/\text{m}$) ⁽⁴⁾	Facteur d'espacement (μm) ⁽⁵⁾
Étude de la formule nominale et de sa reproductibilité, entre t_i⁽⁶⁾ et t_m⁽⁷⁾						
t	1	X	X	X		X
t_m	1	X	X	X		X
t_m	2	X	X	X		
t_m	3	X	X	X		
Si utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air : études des dérivées en air au sein d'une plage $[A_e - x, A_e + y]$⁽⁸⁾ par rapport à la formule nominale, à t_i⁽⁶⁾ ⁽⁹⁾						
A	4	X	X	X	X	X
B	5	X	X	X		
Études des dérivées en eau par rapport à la formule nominale, à t_m⁽⁷⁾						
- 10 l d'eau ⁽¹⁰⁾	6	X	X	X		
+ 10 l d'eau ⁽¹⁰⁾	7	X	X	X	X	X

- (1) Selon les normes d'essais prévues par la norme NF EN 206/CN.
 - (2) Il est d'usage de prévoir également la réalisation d'essais pour déterminer la résistance en compression à 7 jours, pour connaître assez tôt l'incidence éventuelle de l'air entraîné sur les résistances mécaniques.
 - (3) Selon la norme NF EN 12350-7.
 - (4) Selon les normes NF P 18-424 ou NF P 18-425 (cf. 6.4.1.a).
 - (5) Selon la norme ASTM C457-98.
 - (6) t_i est généralement compris entre 5 et 10 minutes après la fin de fabrication de la gâchée i .
 - (7) t_m est la durée pratique d'utilisation du béton. En l'absence d'indication particulière, t_m est pris égal à 90 minutes à partir de t_i . Pour les usines fabriquant des éléments préfabriqués en béton, il est réduit à 30 minutes.
 - (8) L'étude de la sensibilité de la formule à la quantité d'air entraîné consiste à faire varier la quantité d'air entraîné dans une plage $[A_L, A_e, B_C]$. Le choix de cet encadrement est important car il conditionne le critère d'acceptation des teneurs en air occlus sur chantier.
- Note - La méthodologie est présentée en annexe B4, un exemple d'application est proposé en annexe B7.*
- (9) Ces essais servent à corréliser la teneur en air occlus aux résultats de facteur d'espacement. En cas de teneur en air excessive, il est important d'attendre que l'air en excès s'échappe avant de faire les mesures de teneur en air.
 - (10) Les valeurs de variation de la quantité d'eau peuvent être ramenées à ± 5 l si nécessaire, en fonction de la sensibilité de la formulation. C'est notamment le cas des bétons autoplaçant et des bétons à hautes performances. L'encadrement testé doit être compatible avec les ajustements d'eau qui seront réalisés au niveau de la centrale à béton.

Note - Il est recommandé de réaliser en épreuve d'étude plus d'essais que le minimum exigé, de manière à augmenter la probabilité de définir finement l'encadrement des teneurs en air.

Le facteur d'espacement de référence est déterminé à l'issue de l'épreuve d'étude.

Annexe B6

Principales caractéristiques des essais

Les caractéristiques principales des essais liés à la durabilité des bétons au gel et aux sels sont résumées dans le tableau 36.

Tableau 36
Rappel des principales caractéristiques des essais

	Gel dans l'air / dégel dans l'eau	Gel dans l'eau / dégel dans l'eau	Écaillage (gel en présence de sels)	Facteur d'espacement	Teneur en air occlus
Type d'essai	Essai de performance	Essai de performance	Essai de performance	Indicateur de substitution	Indicateur rapide
Norme	NF P 18-425	NF P 18-424	XP P 18-420	ASTM C457-98	NF EN 12350-7
Essai sur béton frais (BF) ou béton durci (BD)	BD	BD	BD	BD	BF
Principe de l'essai	Gel dans la masse d'un corps d'épreuve en béton sous l'effet de cycles de gel/dégel		Exposition d'une face de béton coffré à une saumure en présence de cycles de gel/dégel	Détermination manuelle du réseau de bulles d'air	Mesure de la compressibilité du béton
Prélèvement	3 prismes 10x10x40 cm	3 prismes 10x10x40 cm	4 cubes de 15 cm	Cylindres 15x30 ou 16x32 ou chutes de la découpe des cubes destinés à l'essai d'écaillage	Volume du bol de l'aéromètre à béton (en général : 8 l)
Corps d'épreuve	3 prismes 10x10x40 cm	3 prismes 10x10x40 cm	4 demi cubes 15x15x7,5 cm	En général : 2 plaques 10x10x2,5 cm	
Conservation après démoulage	Dans l'eau jusqu'à 28 jours	Dans l'eau jusqu'à 28 jours	Jusqu'à 14 ± 1 j dans l'eau ; puis jusqu'à 28 ± 1 j dans l'air ⁽¹⁾	Pas d'exigence	
Lancement de l'essai (expositions, mesures)	À 28 jours	À 28 jours	À 31 ± 1 j ⁽¹⁾	Dès que le béton peut être scié et poli sans arrachement de granulats ou détérioration de la pâte (en général, quelques jours)	Immédiat
Cycles de gel/dégel	300 cycles [-18 °C, + 9 °C] environ 4 cycles par jour		56 cycles [-20 °C, + 20 °C] 1 cycle par jour		
Exposition	Gel dans l'air, dégel dans l'eau	Gel dans l'eau, dégel dans l'eau	Exposition de la face coffrée à une saumure à 3 %		
Durée totale de l'essai	Environ 3,5 mois	Environ 3,5 mois	Environ 3 mois	Résultats pouvant être obtenus en moins d'une semaine	Quelques minutes
Résultats d'essai	Allongement relatif (µm/m) Chute du carré des fréquences de résonance $(f_n/f_0)^2$		Perte de masse cumulée par unité de surface (g/m ²)	Facteur d'espacement, demi-distance moyenne des bulles d'air dans la pâte (µm) Teneur en air occlus (%)	Teneur en air occlus (%)

(1) Si essai à 90 j selon dispositions du 6.4.3 : conservation en eau jusqu'à (77 ± 1) j ; conservation dans l'air jusqu'à (90 ± 1) j et mise en enceinte climatique à (93 ± 1) j

Annexe B7

Exemples de calculs, démarches

B7.1 Encadrement de la teneur en air en épreuve d'étude

L'épreuve d'étude porte sur la formulation d'un béton de type C35/45 XF4 D22,4 S3 C10,40 G + S avec entraîneur d'air.

Les seuils à respecter en épreuve d'étude sont les suivants :

- résistance en compression à 28 jours ≥ 35 MPa sur cylindre 15 x 30 ou 16 x 32, soit la prise en compte d'une valeur minimale en épreuve d'étude de $35 + 6 = 41$ MPa, par application du fascicule 65 du CCTG travaux,
- consistance comprise entre 100 et 150 mm à t_m ,
- $L_{\text{barre}} \leq 200 \mu\text{m}$,
- écaillage $\leq 600 \text{ g/m}^2$.

Le détail des fabrications réalisées pour l'étude de sensibilité au dosage en adjuvant entraîneur d'air est présenté dans le tableau 37.

Tableau 37

Étude de la sensibilité du dosage en adjuvant entraîneur d'air ($z = \pm 0,3\%$).

Les valeurs hors spécification sont en gras.

	Formule 1	Formule 2	Formule 3	Formule 4
Dosage adjuvant entraîneur d'air (%)	0,5	0,8	1,1	1,4
Teneur en air à t_m (%)	3,5	5,0	7,0	8,0
Affaissement à t_m (mm)	110	120	140	160
Résistance en compression à 28 jours (MPa)	51,0	46,0	40,0	36,0
L_{barre} (μm)	220	160	100	80

Afin d'augmenter les chances d'encadrer finement la valeur du dosage en adjuvant entraîneur d'air :

- 4 formulations ont été testées (au lieu des 3 obligatoires : nominale, dérivée avec moins d'air, dérivée avec plus d'air),
- les essais de durabilité ont été réalisés sur l'ensemble des gâchées (au lieu des 2 obligatoires : nominale et dérivée avec moins d'air).

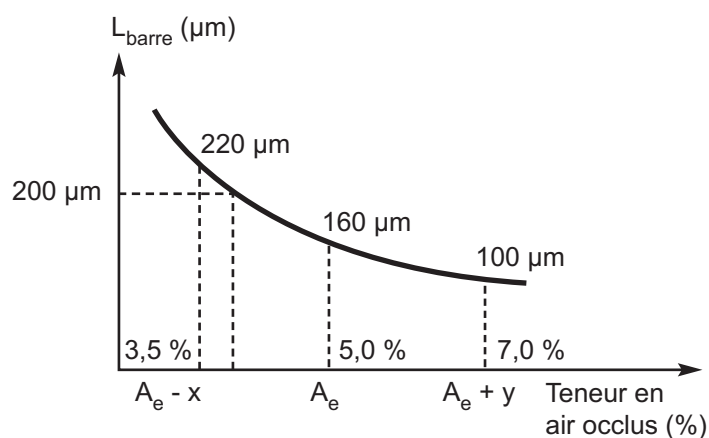
Après examen des résultats, il est décidé de retenir :

- la formule 2 comme formule nominale, avec $A_e = 5,0 \%$,
- la formule 1 comme formule dérivée avec moins d'air, avec $A_e - x = 3,5 \%$,
- la formule 3 comme formule dérivée avec plus d'air, avec $A_e + y = 7,0 \%$.

Ce qui peut être représenté graphiquement tel que présenté sur la figure 21.

Figure 21

Détermination de la plage de teneur en air occlus acceptable du point de vue de la résistance au gel interne



La valeur de teneur en air associée à un L_{barre} de 200 μm peut être obtenue par interpolation linéaire (figure 22).

L'équation de droite correspondante est : $L_{\text{barre}} = a \cdot (\text{teneur en air}) + b$ avec :

$$a = (220 - 160) / (3,5 - 5,0) = -40 \mu\text{m} / \text{point de pourcent d'air} ;$$

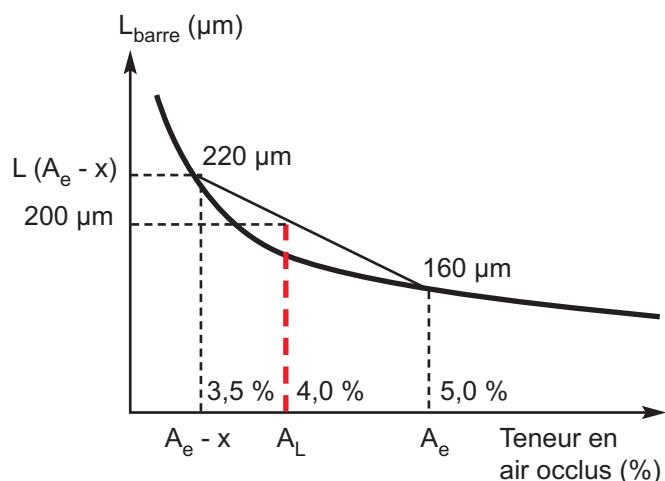
$$b = 220 - 3,5 \times a = 360 \mu\text{m}$$

On en déduit que la valeur de teneur en air associée à un L_{barre} de 200 μm est :
 $(200 - b) / a = (200 - 360) / (-40) = 4 \%$.

La valeur à prendre en compte pour A_L est donc de 4 %.

*Note - En prenant une marge de sécurité de 10 μm ,
on obtiendrait $A_L = (210 - 360) / (-40) = 3,8 \%$.*

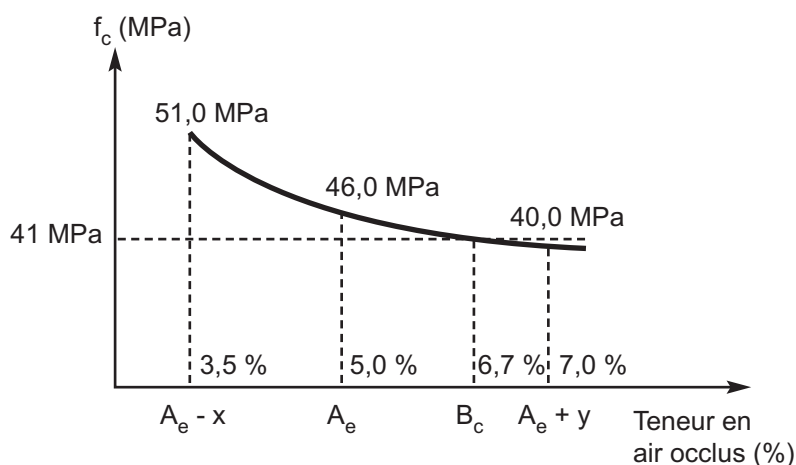
Figure 22

Interpolation linéaire pour déterminer la valeur de A_L 

Concernant la résistance en compression, les résultats peuvent être interprétés de la manière présentée sur la figure 23.

Figure 23

Détermination de la plage de teneur en air occlus acceptable du point de vue de la résistance en compression



La valeur de teneur en air associée à une résistance en compression de 41 MPa peut être obtenue par interpolation linéaire.

L'équation de droite correspondante est $f_c = a \cdot (\text{teneur en air}) + b$ avec :

$$a = (46,0 - 40,0) / (5,0 - 7,0) = -3,0 \text{ MPa} / \text{point de pourcent d'air} ; b = 46,0 - 5,0 \times a = 61,0 \text{ MPa}$$

On en déduit que la valeur de teneur en air associée à une résistance en compression de 41,0 MPa est :

$$(41,0 - b) / a = (41,0 - 61,0) / (-3,0) = 6,3 \%, \text{ que l'on peut arrondir à } 6,0 \% \text{ en étant sécuritaire.}$$

La valeur à prendre en compte pour B_c est donc de 6,0 %. L'encadrement défini en épreuve d'étude pour la teneur en air est donc de [4,0 % ; 6,0 %].

B7.2 Facteur d'espacement de référence

L'épreuve d'étude porte sur la formulation d'un béton de type C30/37 XF3 D22,4 S3 C10,40 G formulé avec un adjuvant entraîneur d'air et un ciment de type CEM III et présentant un $L_{\text{barre}} > 150 \mu\text{m}$.

Les seuils à respecter pour l'essai de gel interne en épreuve d'étude sont les suivants :

- gonflement $\leq 400 \mu\text{m/m}$,
- rapport du carré des fréquences de résonance $\geq 75 \%$.

Les résultats présentés dans le tableau 38 ont été obtenus au cours de l'étude de sensibilité au dosage en adjuvant entraîneur d'air.

Tableau 38

Étude de la sensibilité du dosage en adjuvant entraîneur d'air ($z = \pm 0,3 \%$). Les valeurs hors spécification sont en gras.

	Formule 1	Formule 2	Formule 3
Dosage adjuvant entraîneur d'air (%)	0,5	0,8	1,1
Teneur en air occlus à t_m (%)	3,5	5,0	6,5
Affaissement à t_m (mm)	110	120	140
L_{barre} (μm)	380	300	200
Gel interne : allongement relatif ($\mu\text{m/m}$)	350	150	100
Gel interne : fréquence de résonance (%)	60	90	98

Afin d'augmenter les chances d'encadrer finement la valeur du dosage en adjuvant entraîneur d'air :

- 3 formulations ont été testées (au lieu des 2 obligatoires : nominale, dérivée avec moins d'air),
- les L_{barre} ont été réalisés sur l'ensemble des gâchées (au lieu des 2 obligatoires : nominale et dérivée avec moins d'air),
- les essais de gel interne ont été réalisés sur trois gâchées après obtention des L_{barre} (au lieu d'un essai obligatoire : dérivée avec moins d'air).

Après examen des résultats, il est décidé de retenir :

- la formule 3 comme formule nominale, avec $A_e = 6,5 \%$,
- la formule 2 comme formule dérivée avec moins d'air, avec $A_e - x = 5,0 \%$.

Ce qui peut s'interpréter de la manière présentée sur les figures 24 et 25.

Figure 24

Détermination du facteur d'espacement de référence

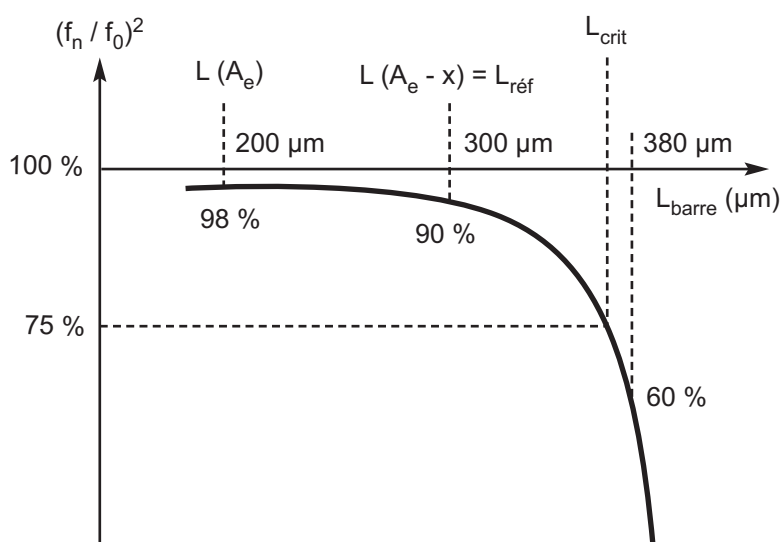
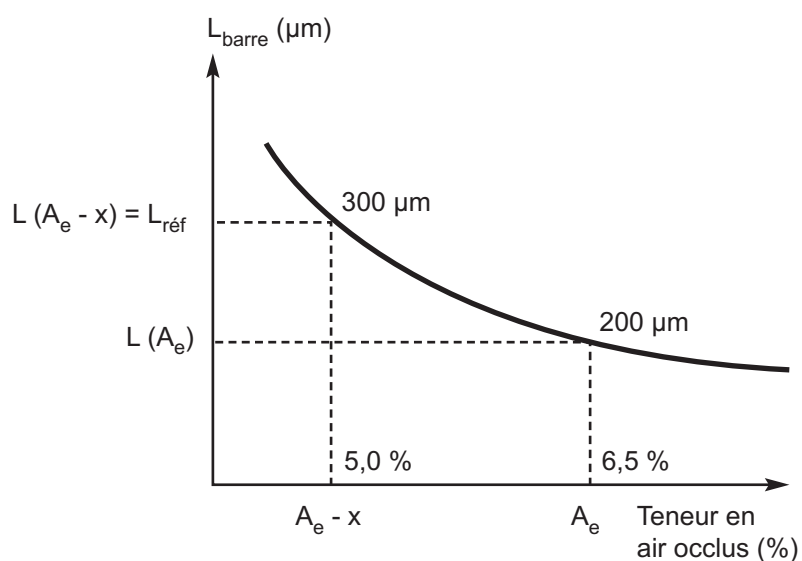


Figure 25

Détermination de la valeur minimale de teneur en air occlus



Le $L_{réf}$ à prendre en compte correspond à la valeur de L_{barre} testée la plus élevée permettant d'obtenir une valeur de $(f_n / f_0)^2$ inférieure ou égale à 75 %.

On a donc ici $L_{réf} = L(A_e - x) = 300 \mu\text{m}$.

La valeur de la teneur minimale en air occlus associée vaut donc 5,0 %.

B7.3 Conformité de la teneur en air en contrôle

Exemple 1

Cas d'un béton C35/45 XF4 D22,4 S3 CI0,40 G + S avec entraîneur d'air pour lequel :

- l'épreuve d'étude a conduit à définir la plage de teneur en air occlus $[A_L ; B_C]$ suivante : [5,5 % ; 7,5 %],
- les résultats de l'épreuve de convenance sont compatibles avec la plage de teneur en air définie en épreuve d'étude.

Dans ce cas, la plage de conformité à utiliser pour les contrôles de la teneur en air sur chantier est : [5,5 - 0,5 ; min (7,5 ; 5,5 + 5)] soit [5,0 % ; 7,5 %].

Exemple 2

Cas d'un béton C35/45 XF4 D22,4 S3 CI0,40 G + S avec entraîneur d'air pour lequel :

- l'épreuve d'étude a conduit à définir la plage de teneur en air occlus $[A_L ; B_C]$ suivante : [3,5 % ; 9,0 %],
- les résultats de l'épreuve de convenance sont compatibles avec la plage de teneur en air définie en épreuve d'étude.

Dans ce cas, la plage de conformité à utiliser pour les contrôles de la teneur en air sur chantier est : [3,5 - 0,5 ; min (9 ; 3,5 + 5,0)] soit [3 % ; 8,5 %].

Références

Les documents ci-après, dans leur intégralité ou non, sont des références permettant l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

Textes généraux

NF EN 13670/CN

Exécution des structures en béton - Complément national à la NF EN 13670:2013 - Tirage 2 (2013-04-01).

Fascicule 65 du CCTG

Travaux - Exécution des ouvrages de génie civil en béton - Décembre 2017 (arrêté du 28 mai 2018).

NF EN 206/CN

Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206.

NF EN 13369

Règles communes pour les produits préfabriqués en béton.

NF DTU 21. DTU 21

Travaux de bâtiment - Exécution des ouvrages en béton - Partie 1-1 : cahier des clauses techniques types - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux (CGM) - Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types - Référence commerciale des parties P1-1, P1-2 et P2 du NF DTU 21 - Tirage 2 (2017-07-01).

NF EN 14487-1

Béton projeté - Partie 1 : définitions, spécifications et conformité.

NF EN 14487-2

Béton projeté - Partie 2 : exécution.

NF P 95-102

Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Béton projeté - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.

Fascicules de l'Asquapro

- Fascicule 3 : mise en œuvre des bétons projetés.
- Fascicule 4 : formulation des bétons projetés.
- Fascicule 5 : qualité du béton projeté : contrôles partie A, qualité du béton projeté, contrôles partie B.

NF P 18-470

Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécification, performance, production et conformité.

NF P 98-430

Barrières de sécurité routières en béton - Séparateurs et murets en béton coulé en place - Définitions, fonctionnement et dimensions.

NF EN 1992-1-1

Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.

NF EN 1992-1-1/NA

Eurocode 2 : calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments - Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1:2005 - Règles générales et règles pour les bâtiments.

NF EN 1992-2

Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 2 : ponts en béton - Calcul des dispositions constructives.

NF EN 1992-2/NA

Eurocode 2 - calcul des structures en béton - Partie 2 : ponts en béton - Calcul et dispositions constructives - Annexe nationale à la NF EN 1992-2:2006 - Ponts en béton - Calcul et dispositions constructives.

École française du Béton

Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton. (Juin 2010).

Compléments sur les classes d'expositions

FD P18-011

Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons.

FD P18-326

Béton - Zones de gel en France.

NF P 94-261

Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.

NF P 94-261/A1

Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles - Amendement 1.

NF P 98-180

Service hivernal - Chlorure de sodium solide utilisé comme fondant routier.

XP P 98-181

Matériels et produits d'entretien routier - Fondants, solides ou liquides, pour le service hivernal des routes et voiries d'usages spécifiques - Critères de performance.

Circulaire de la Direction des Routes relative à la viabilité hivernale
(31 octobre 1996)

Guide méthodologique

Viabilité hivernale - Approche globale - Sétra, (Février 2009).

Guide pratique

Aide à l'élaboration du dossier d'organisation de la viabilité hivernale - Sétra.
(Novembre 1994).

Constituants**NF EN 12620+A1**

Granulats pour béton.

NF P 18-545. Granulats

Éléments de définition, conformité et codification.

NF EN 13055-1

Granulats légers - Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers.

NF EN 197-1

Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

NF P 15-317

Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer.

NF P 15-319

Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

NF EN 450-1

Cendres volantes pour béton - Partie 1 : définition, spécification et critères de conformité.

NF EN 13263-1

Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité.

NF 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.

NF P 18-508

Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité.

NF P 18-509

Additions pour béton hydraulique - Additions siliceuses - Spécifications et critères de conformité.

NF P 18-513

Métakaolin - Addition pouzzolanique pour bétons - Définitions, spécifications, critères de conformité.

NF EN 934-1

Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 1 : exigences communes.

NF EN 934-2

Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.

NF EN 934-5

Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.

NF EN 1008

Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

NF EN 12878

Pigments de coloration des matériaux de construction à base de ciment et/ou de chaux - Spécifications et méthodes d'essai.

NF EN 14889-1

Fibres pour béton - Partie 1 : fibres d'acier - Définitions, spécifications et conformité.

NF EN 14889-2

Fibres pour béton - Partie 2 : fibres polymère - Définition, spécifications et conformité.

Essais

NF EN 1367-1

Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel.

NF EN 1367-6

Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – Partie 6 : résistance au gel-dégel au contact du sel (NaCl).

NF EN 1097-6

Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau.

NF EN 12350-1

Essais pour béton frais - Partie 1 : prélèvement.

NF EN 12350-7

Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité.

XP P 18-420

Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline. (Mai 2012).

NF P 18-424

Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau.

NF P 18-425

Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau.

NF EN 12390-1. Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.

NF EN 12390-2

Essais pour béton durci - Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.

NF EN 12390-3

Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.

NF EN 14488-1

Essais pour béton projeté - Partie 1 : échantillonnage de béton frais et de béton durci.

ASTM C 457-98

Standard test method for microscopical determination of parameters of the air void system in hardened concrete.

Note – Cette norme sera remplacée par la norme française XP P 18-465 dès parution de cette dernière.

Référentiels de certification**Marque NF 085**

Adjuvants pour bétons mortiers et coulis – Produits de cure.

Marque NF 033

Béton prêt à l'emploi, (BPE).

Marque NF 002

Liants hydrauliques.

Termes et définitions

Définitions

Pour les besoins du présent document, les définitions suivantes s'appliquent.

Addition

Matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés, ou pour lui conférer des propriétés particulières.

Ajout

Regroupe tous les produits qui sont incorporés au béton et qui ne sont pas mentionnés au § 5.1 de la norme NF EN 206/CN (par exemple : fibres autres que les fibres d'acier répondant aux exigences de la norme NF EN 14889-1 et que les fibres polymère répondant aux exigences de la norme NF EN 14889-2, produits augmentant la viscosité ou la thixotropie du béton autre qu'un adjuvant, etc.).

Béton architectonique

Béton pour lesquels les parements doivent répondre à des exigences architecturales définies au marché. La qualification « béton architectonique » doit être prescrite au marché.

Béton G

Béton formulé de manière à résister au gel interne seul (niveau de prévention G).

Béton G + S

Béton formulé de manière à résister au gel interne et à l'action des sels de déverglaçage (niveau de prévention G + S).

Charge

Quantité de béton transportée dans un véhicule et comprenant une ou plusieurs gâchées.

Classe de résistance à la compression

Au sens de la norme NF EN 206/CN, classification compilant le type de béton (lourd, léger ou de masse volumique normale), la résistance caractéristique minimale sur cylindre (150 mm de diamètre sur 300 mm de hauteur) et la résistance caractéristique minimale sur cube (150 mm de côté).

Eau gelable

Portion de l'eau contenue dans le béton susceptible de geler, compte-tenu de la température, de la taille des capillaires et de la composition (nature et teneur) en espèces dissoutes.

Eau libre

Eau du béton qui n'est pas liée chimiquement ou physiquement.

Écaillage

Dégradation de la surface du béton qui se manifeste par des altérations localisées de type « pustules » et/ou par le départ de plaques minces « écailles » de mortier et de laitance mettant à nu les granulats. La progression de l'altération peut entraîner le déchaussement des granulats.

Gâchée

Quantité de béton frais produite en un seul cycle par un malaxeur discontinu ou quantité déversée pendant une minute par un malaxeur continu.

Gel interne (ou gel pur)

Dégradation dans la masse du béton due au gel de l'eau contenue dans son réseau de capillaires. Elle se manifeste d'abord par des micro-fissures, puis par un gonflement.

Dans le cas du béton armé, les armatures finissent par être exposées et leur oxydation accentue les désordres.

Journée

Jour calendaire.

Jour de production : Jour au cours duquel a été réalisée une production d'au moins 50 m³ pour le béton concerné. Si la production est inférieure à 50 m³, le jour de production est conventionnellement égal à l'ensemble des journées entières consécutives où l'on a atteint une production cumulée de 50 m³.

Liant équivalent (noté liant eq dans le présent document)

Concept prescriptif, défini dans la norme NF EN 206/CN, autorisant la prise en compte partielle des additions de type II et de certaines additions de type I pour le calcul de la quantité minimale de liant à incorporer au mélange.

La quantité de liant équivalent est définie par la formule :

$$\text{liant équivalent} = \text{ciment} + k \times \text{addition}$$

Le terme « rapport eau/ciment » est alors remplacé par :

$$\text{rapport (eau efficace)} / (\text{ciment} + k \times \text{addition})$$

La quantité de liant équivalent ne doit pas être inférieure à l'exigence de teneur minimale en ciment pour la classe d'exposition concernée.

Microbilles plastiques déformables

Microbilles utilisées pour améliorer la résistance au gel avec ou sans sels du béton, en remplacement de l'adjuvant entraîneur d'air. Elles sont incorporées en centrale pendant la fabrication du béton frais.

Résistance caractéristique

Valeur de résistance en dessous de laquelle il est probable que se situent 5 % des résultats de toutes les mesures de résistance possibles effectuées pour le volume de béton considéré.

Spécification

Document qui prescrit les exigences auxquelles le produit ou le service doit se conformer. Les spécifications traduisent les exigences de résultats en s'appuyant sur un ensemble de grandeurs d'essais, auxquelles elles fixent des limites. La spécification du béton frais et durci peut résulter de plusieurs prescriptions complémentaires provenant de plusieurs prescripteurs.

Sigles et acronymes

Asquapro

Association pour la qualité de la projection des bétons.

Cofrac

Comité français d'accréditation.

Hi

Zone de rigueur hivernale.

Symboles

A

Quantité d'addition par mètre cube de béton prise en compte dans le liant équivalent (en kg/m^3) et dont la valeur maximale est définie par le rapport $A/(A + C)$ précisé dans les tableaux de l'annexe NA.F de la norme NF EN 206/CN pour les différentes classes d'exposition. Si une plus grande quantité d'addition est utilisée, l'excédent ne doit être pris en compte ni pour le calcul du rapport eau/(ciment + $k \times$ addition), ni pour le dosage minimal en liant équivalent.

A_e

Teneur en air occlus (en %) obtenue sur la formule nominale pendant l'épreuve d'étude.

A_L

Teneur en air occlus minimale (en %) mesurée permettant de garantir la résistance au gel du béton, selon le type de composition, sur la base d'un essai de performance selon les normes NF P 18-424 / NF P 18-425 ou de la détermination du facteur d'espacement au niveau des épreuves d'étude et de convenance, en prenant en compte une marge de sécurité.

B_1

Valeur minimale mesurée de teneur en microbilles plastiques déformables (en % volumique) associée à la conformité des essais de durabilité au gel avec ou sans sels.

B_2

Valeur maximale mesurée de teneur en microbilles plastiques déformables (en % volumique) garantissant l'obtention des résistances en compression conformes.

B_C

Teneur en air occlus maximale (en %) mesurée garantissant l'obtention d'une valeur de résistance en compression conforme au niveau des épreuves d'étude et de convenance.

B_e

Teneur en microbilles plastiques déformables (en % volumique) mesurée sur la formule nominale.

D ou D_{\max}

Dimension nominale du plus gros granulat, exprimée en mm.

E_{eff} / Liant eq

Rapport entre les quantités E_{eff} et Liant eq, où :

E_{eff} est la quantité d'eau efficace

Liant eq est la quantité de liant équivalent ($C+k.A$)

toutes les deux exprimées en kg/m^3 .

f_{c1}

La plus petite des valeurs de résistance en compression du lot (en MPa).

\bar{f}_c

Moyenne arithmétique des résultats de résistance en compression sur les différents prélèvements du lot (en MPa).

f_{CE}

Résistance en compression sur la formule nominale obtenue en épreuve d'étude ou de convenance (en MPa).

f_{ck}

Résistance caractéristique en compression du béton (en MPa).

k

Coefficient de prise en compte de l'addition considérée dans le calcul du liant équivalent. Les valeurs sont fixées par la norme NF EN 206/CN.

 k_1

Paramètre lié à l'estimation de l'écart type (en MPa).

 L_{barre} (noté aussi \bar{L})Facteur d'espacement (en μm). Grandeur représentant la demi-distance moyenne entre les parois des bulles d'air contenues dans la pâte du béton. Elle correspond à la distance moyenne que doit parcourir l'eau dans la pâte pour trouver un vase d'expansion. **$L_{barre}(z)$** (noté aussi $\bar{L}(z)$)Facteur d'espacement (en μm) associé à la teneur en air z. **L_{crit}** Facteur d'espacement critique (en μm). L_{crit} est la valeur maximale du facteur d'espacement permettant d'obtenir la valeur minimale admissible du ratio du carré des fréquences à l'issue des 300 cycles gel-dégel (soit 75 % en épreuve d'étude ou de convenance et 60 % en épreuve de contrôle). L_{crit} peut être déterminé expérimentalement sur la courbe :

$$[\text{chute de fréquence de résonance}] = f(\bar{L}).$$

 $L_{réf}$ Facteur d'espacement de référence (en μm). Pour une composition de béton donnée, $L_{réf}$ est la valeur du facteur d'espacement mesuré sur la formule dérivée avec moins d'air permettant d'obtenir un ratio du carré des fréquences à l'issue des 300 cycles gel-dégel supérieur à la valeur minimale admissible, soit 75 % en épreuve d'étude ou de convenance. Le $L_{réf}$ peut être déterminé expérimentalement sur la courbe :

$$[\text{chute de fréquence de résonance}] = f(L).$$

Sa valeur est inférieure à celle du L_{crit} .**m**

Marge de sécurité (en MPa).

 t_i

Durée (en min) au bout de laquelle est réalisée la première mesure sur la gâchée i.

 t_m

Durée pratique d'utilisation du béton (en min).

x

Écart de teneur en air (en point de %) entre la dérivée avec moins d'air et la formule nominale en épreuve d'étude.

y

Écart de teneur en air (en point de %) entre la formule nominale et la dérivée avec plus d'air en épreuve d'étude.

z

Écart de dosage en adjuvant entraîneur d'air (en point de %) entre la formule nominale et les dérivées en air en épreuve d'étude.

Bibliographie

Comportement au gel avec ou sans sels

BOUTEILLE S. *Outils de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles de gel-dégel en présence de sels*. Rapport de thèse UPE. **2013**.

CORR D.-J., MONTEIRO P.-J.-M. et BASTACKY J. *Microscopic characterization of ice morphology in entrained air voids*. ACI Materials Journal. V99 (N2),190-195. **2002**.

FEN-CHONG T. *Concrete sustainability under freezing - a material science standpoint*. Cours Durbé, École nationale des Ponts et Chaussées. **2008**.

KORHONEN C. *Effect of High Dose of Chemical Admixtures on the Freeze-Thaw Durability of Portland Cement Concrete*. ERDC/CRREL TR-02-5. **2002**.

MARCHAND J. *Contribution à l'étude de la détérioration par écaillage du béton en présence de sels fondants*. Rapport de thèse ENPC. **1993**.

OKADA E., HISKA M., KAZAMA Y. et HATTORY K. *Freeze-thaw resistance of superplasticized concretes. Development in the use of superplasticizers*, ACI SP-68, p. 215–231. **1981**.

PIGEON M., LACHANCE M. *Critical air void spacing factors for concrete submitted to slow freeze-thaw cycles*. ACI, proceedings, 78(4), p.282-291. **1981**.

PLEAU R., PIGEON M., LAURENCOT J.-L. *Some Findings on the Usefulness of Image Analysis for Determining the Characteristics of the Air Void System on Hardened Concrete*. Cement and Concrete Composites, vol.23, pp.237-246. **2001**.

POWERS T.-C., HELMUTH R.-A. *Theory of volume changes in hardened Portland-cement paste during freezing*. Highway Research Board, vol. 32, p.285-297. **1953**.

QIANG Z. *Poromechanical behavior of cement-based materials subjected to freeze-thaw actions with salts*. Rapport de thèse Ifsttar. **2010**.

VALENZA J.-J., SCHERER G.-W. *A Review of Salt Scaling : II. Mechanisms, Cement and Concrete Research*. vol.37, pp1022-1034. **2007**.

VALENZA J.-J., SCHERER G.-W. *Mechanism for Salt Scaling*. J. Am. Ceram. Soc. 89 [4] p.1161–1179, DOI : 10.1111/j.1551-2916.2006.00913.x. **2006**.

WESSMAN L. *Studies on the frost resistance of natural stone*. Lund University, Lund Institute of Technology. Doctoral thesis Report TVBM-3077. **1997**.

Laitiers de hauts fourneaux

ATILH. *Évaluation de la durabilité des bétons de CEM III soumis au gel sévère : vers une possible introduction de ce type de ciment dans les recommandations*. **2008**.

Métakaolins

ADNAN Ç. *Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan*. Cement and concrete research. Vol. 33, n° 4, p. 585-593, **2003**.

CHABANNET M. *Gel interne de matrices cimentaires sous sollicitation mécanique-intérêt du métakaolin*. Insa Lyon. **1994**.

GIRODET C. *Endommagement des mortiers sous sollicitations thermodynamiques. Influence des caractéristiques de matériaux sur la résistance au gel interne des bétons*. Rapport de thèse, Insa Lyon. **1996**.

KIM H.-S., LEE S.-H., MOON H.-Y. *Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin*, Construction and building materials. Vol. 21, n° 6, p. 1229-1237. **2007**.

SAN NICOLAS R. *Approche performancielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash*. Thèse de l'Université de Toulouse. **2011**.

VEJMEJKOVA E., PAVLIKOVA M., KEPPERT M., KERSNER Z., ROVNANIKOVA P., ONDRACEK M., SEDLMAJER M., ČERNÝ R. *High performance concrete with czech metakaolin : experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics*. Construction and building materials. Vol. 24, n° 8, p. 1404-1411. **2010**.

ZHANG M.-H., MALHOTRA V.-M. *Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete*. Cement and concrete research. Vol. 25, n° 8, p. 1713-1725. **1995**.

Fiche bibliographique

Collection techniques et méthodes		Sous collection guide technique	
ISSN 2492-5438		ISBN Pdf : 978-2-85782-754-2	Référence GTI6
Titre Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel Environnements hivernaux rigoureux			
Auteurs Université Gustave Eiffel et Cerema			
Coordinateurs de la publication BAROGHEL-BOUNY Véronique (Université Gustave Eiffel) DIERKENS Michaël (Cerema)			
Contributeurs Les membres du groupe de travail			
Date de publication Octobre 2021		Langue Français	
Résumé Les présentes recommandations définissent des dispositions destinées à prévenir les dégradations du béton par des cycles de gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage. Le domaine d'application est celui des bâtiments non courants ou des ouvrages de génie civil soumis à du gel modéré avec emploi de sels de déverglaçage ou à du gel sévère. Elles s'appliquent aux bétons destinés aux structures coulées en place, aux structures constituées de produits préfabriqués, ainsi qu'aux bétons destinés aux produits préfabriqués. Elles sont adaptées à une durée d'utilisation de projet de 100 ans. La démarche est fondée sur la définition de deux niveaux de prévention (G et G + S) conduisant à la définition de dispositions relatives aux règles de formulation des bétons, à l'organisation des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle, ainsi qu'aux modalités de mise en œuvre. Ces recommandations constituent la révision du document publié en décembre 2003. Les principales évolutions concernent la mise à jour des modalités de prescription des niveaux de prévention, l'intégration de nouveaux constituants ou méthodologies de formulation sur une base performantielle et la clarification du contenu des épreuves.			
Mots clés béton, durabilité, gel, écaillage, prescription, essais, contrôles, génie civil			
Nombre de pages 120		Prix Gratuit	

Publication data form

Collection technics and methods		Sub collection technical guide	
ISSN 2492-5438		ISBN Pdf : 978-2-85782-754-2	
Reference GTI6			
Title Recommendations for the durability of concrete subjected to frost Harsh winter environments			
Authors University Gustave Eiffel and Cerema			
Coordinators of the publication BAROGHEL-BOUNY Véronique (Université Gustave Eiffel) DIERKENS Michaël (Cerema)			
Contributors The members of the working group			
Publication date October 2021		Language French	
Summary These recommendations define provisions intended to prevent concrete degradation by freezing-thawing cycles with or without de-icing salts. The field of application is that of non-current buildings or civil engineering structures subjected to moderate frost with the use of deicing salts or to severe frost. They apply to concrete intended for cast-in-place structures, structures made from precast products, as well as concrete intended for precast products. They are suitable in the case of Service Life of 100 years. The approach is based on the definition of two levels of prevention (G and G+S), leading to the definition of provisions relating to concrete mix-design rules, to the organization of study, suitability and control trials, as well as to the implementation arrangements. These recommendations stand for the revision of a previous document published in December 2003. The main changes concern the updating of the method of prescribing levels of prevention, the integration of new constituents or mix-design methodologies on a performance basis, and the clarification of the content of the tests.			
Key words concrete, durability, frost, scaling, prescription, tests, monitoring, civil engineering			
Number of pages 120		Price Free	

Document publié par l'université Gustave Eiffel

Dépôt légal : octobre 2021

ISBN : 978-2-85782-754-2

ISSN : 2492-5438

Conception graphique et mise en page : Philippe Caquelard, université Gustave Eiffel

Siège de l'université Gustave Eiffel

5, boulevard Descartes

Champs-sur-Marne

77454 Marne-la-Vallée cedex 2

www.univ-gustave-eiffel.fr

Les présentes recommandations définissent des dispositions destinées à prévenir les dégradations du béton par des cycles de gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage. Le domaine d'application est celui des bâtiments non courants ou des ouvrages de génie civil soumis à du gel modéré avec emploi de sels de déverglaçage ou à du gel sévère. Elles s'appliquent aux bétons destinés aux structures coulées en place, aux structures constituées de produits préfabriqués, ainsi qu'aux bétons destinés aux produits préfabriqués. Elles sont adaptées à une durée d'utilisation de projet de 100 ans. La démarche est fondée sur la définition de deux niveaux de prévention (G et G + S) conduisant à la définition de dispositions relatives aux règles de formulation des bétons, à l'organisation des épreuves d'étude, de convenance et de contrôle, ainsi qu'aux modalités de mise en œuvre. Ces recommandations constituent la révision du document publié en décembre 2003. Les principales évolutions concernent la mise à jour des modalités de prescription des niveaux de prévention, l'intégration de nouveaux constituants ou méthodologies de formulation sur une base performantielle et la clarification du contenu des épreuves.



LES COLLECTIONS DE L'IFSTTAR



ISSN : 2492-5438

Référence : GTI6

Crédit photo : Pierre Vuillemin

Octobre 2021