

RECOMMANDATIONS : BIEN PRESCRIRE LES BÉTONS

PRESCRIPTIONS COMPLÉMENTAIRES RELATIVES À LA PRÉVENTION VIS-À-VIS DU GEL / DEGEL

Le choix de la caractéristique complémentaire G ou G+S, pour chaque partie d'ouvrage, en complément des dispositions normatives associées à la classe d'exposition XF3 ou XF4, est de la responsabilité du maître d'ouvrage, qui peut l'utiliser pour les ouvrages nécessitant un niveau de fiabilité supérieur vis-à-vis de la résistance aux effets du gel en présence ou non de sels, par exemple les ponts routiers en zone de gel sévère.

Les niveaux de gel et de salage, les classes d'exposition, la catégorie d'ouvrage et les éventuelles caractéristiques complémentaires associées à chaque partie d'ouvrage doivent être prescrites par le rédacteur du CCTP et précisées dans le CCTP (cf. tableau présenté dans la fiche « Décomposition en parties d'ouvrage et tableau de définition des bétons »).

Exemple de texte à intégrer dans le CCTP :

L'entreprise a la responsabilité de mettre en œuvre les prescriptions décrites dans les **Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel (UGE-2021)**.

Pour l'application des Recommandations (UGE-2021) :

les parties d'ouvrages relevant de la classe d'exposition XF3 avec caractéristique complémentaire G sont les suivantes : [...]. Les parties d'ouvrages relevant de la classe d'exposition XF4 avec caractéristique complémentaire G+S sont les suivantes :
[...].

Nota : Les Recommandations (UGE-2021) doivent être prescrites dans les pièces du marché pour être applicables.

Au sens de la norme NF EN 206/CN, la prévention des dégradations du béton durci sous l'effet de cycles de gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage passe par la définition des classes d'exposition XF1 à XF4 (voir Recommandations « Choix des classes d'exposition selon la norme NF EN 206/CN »).

Dans le cas où le risque de dégradation au gel ou à l'écaillage représente un enjeu majeur (type d'ouvrage, forte exposition aux cycles de gel/dégel, durée d'utilisation de projet supérieure à 50 ans...), le rédacteur du CCTP peut souhaiter renforcer les dispositions découlant des classes XF spécifiées dans la norme NF EN 206/CN en prescrivant une **caractéristique complémentaire** G (gel) ou G+S (gel+sels) permettant de renforcer les **spécifications** sur les matériaux, les limites de composition, l'interprétation des essais et les épreuves (études, convenances, contrôles). Ce cas de figure correspond aux ouvrages relevant de la catégorie C des Recommandations (UGE-2021).

GÉNÉRALITÉS

Les bétons soumis à des cycles de gel/dégel en présence d'eau peuvent être concernés par deux types principaux de dégradations :

- Les dégradations par **gel interne**, qui se manifestent par une fissuration dans la masse du béton
- Les dégradations par **écaillage**, qui se manifestent par une perte d'écaillés de béton, depuis la surface vers la profondeur, **en présence de sels de déverglaçage**.

Gel interne. Lorsque la température au sein du béton décroît, l'eau contenue dans les pores capillaires gèle à une température dépendant du rayon des pores et des espèces ioniques (en nature et concentration) présentes en solution. Ainsi, même à des températures inférieures à -10°C par exemple, toute l'eau libre du béton n'est pas gelée. La part de l'eau ayant gelée augmente d'environ 9% en volume. Il en résulte une mise en pression de l'eau non gelée et une circulation de fluides à l'intérieur de la porosité du béton. Si les contraintes induites sont supérieures à la résistance en traction de la pâte cimentaire, il y a endommagement du béton. L'incorporation de micro-bulles d'air dans la pâte cimentaire, au moyen d'un adjuvant entraîneur d'air, permet de diminuer les pressions hydrauliques en facilitant la circulation de l'eau n'ayant pas gelé. L'incorporation de microbilles plastiques compressibles permet d'atteindre le même type de résultat (d'après des essais réalisés en enceinte climatique).

Ecaillage. En plus du mécanisme précédemment décrit, la présence de sels de déverglaçage en surface conduit à rendre le béton de peau moins gélif que le béton de cœur. Il en résulte un retrait différentiel pendant la phase de gel, pouvant conduire à une desquamation du béton.

Paramètres d'influence :

- Exposition au gel (cycles de gel/dégel, accessibilité au gel de la partie d'ouvrage...)
- Exposition au sel (niveau de salage, distance, orientation de la partie d'ouvrage...)
- Saturation en eau (surface horizontale ou soumise aux projections)
- Gélivité des granulats
- Résistance minimale de la pâte à la traction (nature du liant, rapport Eau Efficace/Liant Equivalent...)
- Structure du réseau poreux (capacité d'entraîner de l'air, taille et espacement moyen des pores...)

...
Sauf en situation de gel très sévère sur de longues périodes, les parties d'ouvrages enterrées à plus de 1 m de profondeur ne sont en général pas concernées.

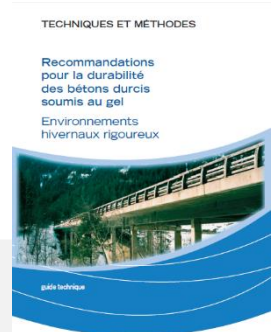
Les parties d'ouvrages sèches ne sont pas concernées (intérieur de bâtiment chauffé...).

TEXTES DE RÉFÉRENCE

La démarche de prévention est définie par les **Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel (UGE-2021)**.

Ce guide remplace les Recommandations LCPC de 2003. Par rapport à la version de 2003, les principales évolutions ont porté sur les points suivants :

- Le nouveau document est structuré par thématique (constituants, essais, épreuves...) plutôt que par type de béton ;
- 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 épreuves (études, convenances et contrôles).



Normes d'essais :

- NF P18-424. Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'eau - Dégel dans l'eau. [dit « essai de gel sévère »]
- NF P18-425. Bétons - Essai de gel sur béton durci - Gel dans l'air - Dégel dans l'eau. [dit « essai de gel modéré »]
- XP P18-420. Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.
- NF EN 12350-7. Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité.
- XP P18-465. Bétons durcis - Détermination du facteur d'espacement des bulles d'air.

PRINCIPE GÉNÉRAL DE PRÉVENTION AU GEL/DEGEL

Dans le cas où le risque de dégradation au gel ou à l'écaillage représente un enjeu majeur (montagne, forte exposition aux sels avec cycles de gel/dégel...), ce qui correspond notamment aux ouvrages de catégorie C des Recommandations (UGE-2021), le rédacteur du CCTP peut renforcer les dispositions normatives associées aux classes d'exposition XF3 ou XF4, en garantissant la résistance au gel/écaillage par :

- le renforcement des étapes d'étude, convenance et contrôle
- l'obtention de résultats d'essais

Ce renforcement des prescriptions des classes d'exposition XF3 et XF4 s'exprime par l'ajout d'une caractéristique complémentaire G ou G+S.

- G : pour les bétons devant résister aux cycles de gel/dégel pur.
- G + S : pour les bétons devant résister aux cycles de gel/dégel en présence de sels de déverglaçage.

Le tableau ci-dessous constitue une aide permettant de déterminer quand prescrire ces caractéristiques complémentaires, en fonction des niveaux de gel et de salage et de l'exposition au risque d'écaillage.

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 fréquent	Salage très fréquent	Salage peu fréquent ou aucun	Salage fréquent	Salage très fréquent
oui	Forte	XF1	XF2	XF4 (G+S)	XF3 (G)	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)
	Faible	XF1	XF2	XF2	XF3 (G)	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)
non	Forte	XF1	XF1	XF1	XF3 (G)	XF3 (G)	XF3 (G)
	Faible	XF1	XF1	XF1	XF3 (G)	XF3 (G)	XF3 (G)

Tableau 1 : détermination des caractéristiques complémentaires G et G+S, associées aux classes d'exposition XF3 et XF4

Suite à l'évolution de la définition des classes d'exposition, il y a lieu de distinguer :

- Les pièces soumises aux sels de déverglaçage, du point de vue de la corrosion : parties d'ouvrages situées à moins de 6 m horizontalement et verticalement de la voie salée ;
- Les pièces très exposées au risque d'écaillage : parties d'ouvrages horizontales soumises aux projections directes de sels de déverglaçage.

Cette distinction conduit à rendre inutilisable les tableaux de l'EFB pour la détermination des classes XF2 et XF4. Afin de guider le prescripteur, un tableau d'aide à la détermination des classes d'exposition XF1 à XF4 est proposé en annexe B3 des Recommandations (UGE-2021) dans le cas particulier des ouvrages d'art.

Les principales différences entre les prescriptions associées aux classes d'exposition XF3 et XF3 (G) [respectivement XF4 et XF4 (G+S)] sont résumées dans le synoptique de la figure 1 [respectivement fig. 2], dans le cas de formulations courantes.

Des exemples concrets d'application de la démarche sont fournis en annexe B7 des Recommandations (UGE, 2021).

Classes d'exposition XF3	
XF3	XF3 (G)
Texte de référence	NF EN 206/CN
Exigences spécifiques :	essais initial matériaux, résistance en compression et limites de composition selon NF EN 206/CN
Méthode de validation de la résistance au gel :	teneur en air spécifiée (NF EN 12350-7) OU essai de performance au gel interne (NF P18-424 ou NF P18-425)
Critères essais préalable à la production :	<u>seuils pour l'essai initial :</u> teneur en air $\geq 4\%$ avec résistance en compression conforme OU gel interne : $\Delta l/l \leq 400 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,75$
Critères en contrôle :	teneur en air pouvant s'écarter de -0,5 à +5 point de pourcent par rapport à la valeur minimale spécifiée (soit comprise dans une plage de 3,5 à 9% pour une valeur minimale spécifiée de 4%). OU gel interne : $\Delta l/l \leq 500 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,60$
	NF EN 206/CN et Recommandations UGE 2021
	études et convenances spécifiques. renforcement exigences sur matériaux, résistance en compression et limites de composition.
	teneur en air (NF EN 12350-7) ET Lbarre (XP P18-465) OU essai de performance au gel interne (NF P18-424 ou NF P18-425)
	<u>seuils pour étude/convenance :</u> teneur en air : détermination de la plage de valeur garantissant un Lbarre $\leq 250 \mu\text{m}$ et une résistance en compression conforme. OU gel interne : $\Delta l/l \leq 400 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,75$
	teneur en air : comprise dans la plage validée en étude et convenance, sans dépasser +5 point de pourcent pas rapport à la valeur minimale autorisée. Lbarre : $\leq 300 \mu\text{m}$ OU gel interne : $\Delta l/l \leq 500 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,60$

Figure 1 : principales spécifications induites par la caractéristique complémentaire G

Classes d'exposition	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">XF4</div>
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">XF4</div>
Texte de référence	NF EN 206/CN
Texte de référence	NF EN 206/CN et Recommandations UGE 2021
Exigences spécifiques :	essais initial matériaux, résistance en compression et limites de composition selon NF EN 206/CN
Exigences spécifiques :	études et convenances spécifiques. renforcement exigences sur matériaux, résistance en compression et limites de composition.
Méthode de validation de la résistance au gel/sel :	<p>teneur en air spécifiée (NF EN 12350-7)</p> <p style="text-align: center;">OU</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">essais de performance : gel interne (NF P18-424 ou NF P18-425) ET écaillage (XP P18-420)</p> </div>
Méthode de validation de la résistance au gel/sel :	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">teneur en air (NF EN 12350-7) ET Lbarre (XP P18-465)</p> <p style="text-align: center;">OU</p> <p style="text-align: center;">essai de performance gel interne (NF P18-424 ou NF P18-425)</p> </div> <p style="text-align: center;">ET</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">essai de performance d'écaillage (XP P 18 420)</p> </div>
Critères essais préalables à la production :	<p style="text-align: center;"><u>seuils pour l'essai initial :</u></p> <p style="text-align: center;">teneur en air $\geq 4\%$ avec résistance en compression conforme</p> <p style="text-align: center;">OU</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">gel interne : $\Delta l/l \leq 400 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,75$ ET écaillage : $\leq 600 \text{ g/m}^2$</p> </div>
Critères essais préalables à la production :	<p style="text-align: center;"><u>seuils pour étude/convenance :</u></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">teneur en air : détermination de la plage de valeur garantissant un Lbarre $\leq 200 \mu\text{m}$ et une résistance en compression conforme.</p> <p style="text-align: center;">OU</p> </div> <p style="text-align: center;">gel interne : $\Delta l/l \leq 400 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,75$</p> <p style="text-align: center;">ET</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">écaillage : $\leq 600 \text{ g/m}^2$</p> </div>
Critères en contrôle :	<p>teneur en air pouvant s'écarter de -0,5 à +5 point de pourcent par rapport à la valeur minimale spécifiée (soit comprise dans une plage de 3,5 à 9% pour une valeur minimale spécifiée de 4%).</p> <p style="text-align: center;">OU</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">gel interne : $\Delta l/l \leq 500 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,60$</p> <p style="text-align: center;">ET</p> <p style="text-align: center;">écaillage : $\leq 750 \text{ g/m}^2$</p> </div>
Critères en contrôle :	<p>teneur en air : comprise dans la plage validée en étude et convenance, sans dépasser +5 point de pourcent pas rapport à la valeur minimale autorisée. Lbarre : $\leq 250 \mu\text{m}$</p> <p style="text-align: center;">OU</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">gel interne : $\Delta l/l \leq 500 \mu\text{m/m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,60$</p> <p style="text-align: center;">ET :</p> <p style="text-align: center;">écaillage : $\leq 750 \text{ g/m}^2$</p> </div>

Figure 2 : principales spécifications induites par la caractéristique complémentaire G+S

COMPLÉMENTS D'INFORMATIONS UTILES POUR LA PRESCRIPTION

Comment le maître d'ouvrage choisit-il la caractéristique complémentaire adaptée ?

Sauf dans le cas où le maître d'ouvrage aurait une compétence technique forte dans le domaine de la prévention au gel/écaillage, la démarche recommandée est celle exposée dans le tableau 1.

Quels types d'ouvrages sont concernés ?

Lorsque la classe d'exposition est XF3 ou XF4, une prescription de caractéristique complémentaire G ou G+S peut être rajoutée pour les ouvrages suivants :

- Ouvrages avec une durée d'utilisation de projet supérieure à 50 ans (et donc tous les ouvrages de génie civil), avec en particulier :
 - Ouvrages d'art : ponts routiers, autoroutiers ou ferroviaires
 - Bâtiments de prestige
 - Têtes de tunnels
 - ...
- Ouvrages particulièrement exposés ayant une durée d'utilisation de projet inférieure à 50 ans (opportunité à étudier au cas par cas) :
 - Parkings
 - Remontées mécaniques
 - Pistes d'aéroports et parkings avions (bétons G uniquement*)
 - Stockages de sels
 - ...

* le risque d'écaillage lié aux fondants non ioniques utilisés sur les pistes d'aéroports ne sont pas couverts par les Recommandations UGE de 2021.

Quelle différence entre XF3 et XF3 G ; XF4 et XF4 G+S ?

Les classes d'exposition XF1 à XF4 renvoient à des prescriptions (NF EN 206/CN, ou le cas échéant fasc. 65, IN 0034...) relatives :

- Au rapport maximal Eau Efficace/Liant Equivalent,
- Au dosage minimal en Liant Equivalent,
- Aux caractéristiques complémentaires des ciments (ES/SR),
- Aux taux de substitution autorisés du ciment (CEMI ou CEM II/A) par des additions,
- À la teneur minimale en air occlus,
- Aux valeurs minimales d'enrobage (norme NF EN 1992-1-1).

Les caractéristiques complémentaires G / G+S renforcent ces exigences par :

- Des valeurs plus strictes pour les limites de composition,
- Des spécifications sur la nature des constituants du béton,

- Des performances vérifiées sur la base d'essais semi-performantiels (essais d'écaillage et/ou de gel interne en enceinte climatique) ou d'indicateurs de substitution (L_{barre} = facteur d'espacement des bulles d'air), avec une définition des seuils d'acceptation,
- Des programmes détaillés pour les études, convenances et contrôles.

Ces différences d'approche sont résumées dans les figures 1 et 2.

Faut-il imposer ou interdire certains ciments/additions/granulats ?

Dans le cas général, la validation du choix des constituants relève de la responsabilité de l'entreprise et/ou du producteur de béton. Il faut donc veiller à ce que les prescriptions du marché relatives aux constituants ne soient pas trop contraignantes, sous peine d'aboutir rapidement à des impossibilités techniques.

Cependant, du fait des particularités liées à la dégradation par gel/dégel, des prescriptions détaillées sur les constituants et les limites de composition sont définies dans les Recommandations UGE de 2021. Elles prennent en compte les aspects suivants :

- Les granulats doivent être non gélifs ;
- Des précautions sont à prendre sur le choix des liants.

L'Annexe A des Recommandations (UGE-2021) définit des modalités de validation pour les formulations non courantes utilisant :

- Des granulats de résistance au gel F2 à F4 ;
- Des teneurs en laitier de hauts fourneaux supérieures à 35% en masse du liant total ;
- Des cendres volantes ;
- Des ciments autres que les ciments CEM I, CEM II/A ou B ou CEM IV ;
- Des microbilles plastiques.

L'emploi de ces formulations nécessite l'accord explicite du maître d'œuvre.

Les ciments introduits par la norme NF EN 197-5 ne sont pas autorisés dans le cadre des Recommandations (UGE, 2021) pour les formulations avec adjuvant entraîneur d'air.

Peut-on réaliser les essais de durabilité au gel au-delà de 28 j pour les bétons formulés avec des additions ou des ciments composés ?

A la différence de pathologies telles que la carbonatation des bétons, les endommagements liés au gel/écaillage peuvent se produire dès le premier hiver d'exposition. Il en résulte que les essais de durabilité en enceinte climatique doivent être dans le cas général réalisés à 28 j (conformément aux normes d'essais), même si les propriétés du béton pourraient être améliorées par un temps de maturation plus long.

Dans le cas particulier où l'ouvrage ne serait pas soumis aux sels de déverglaçage avant 90 j (majorité des ouvrages neufs, certaines pièces préfabriquées...), il est possible de réaliser l'essai d'écaillage à 90 j selon les modalités d'essais décrites au §6.4.3 des Recommandations (UGE, 2021).

Quelles sont les conséquences de la prescription d'une caractéristique complémentaire G ou G+S ?

Ces caractéristiques complémentaires sont à réserver dans le cas où la résistance au gel/écaillage représente un enjeu majeur, ce qui est généralement le cas pour les ouvrages relevant d'une durée d'utilisation de projet de 100 ans. En effet, ces prescriptions conduisent à :

- Écarter ou limiter certains constituants,
- Augmenter les dosages en liant équivalent, ce qui nécessite une prise en compte adaptée du risque de développement d'une RAG ou RSI,
- Augmenter potentiellement le risque de corrosion (si présence d'air entraîné),
- Augmenter les risques de problèmes de résistance et de mise en œuvre (si mauvaise maîtrise de l'air entraîné),
- Augmenter les délais (essais longs, études et convenances lourdes).

Quelles sont les implications d'une modification de composition du béton ?

En cours de chantier, toute modification de la composition du béton doit conduire à s'interroger sur le maintien des conditions de non gélivité du béton. Si la modification est importante au sens de la durabilité au gel et aux sels, il est indispensable de réaliser à nouveau les études et convenances (délais d'essais importants).

Les modalités de prise en compte des adaptations saisonnières des formulations sont définies dans le §8.2.3. des Recommandations (UGE, 2021).

Quel essai choisir pour valider une composition de béton vis-à-vis du risque de gel interne ou d'écaillage ?

Les essais peuvent être classés en trois catégories :

- Les essais semi-performantiels, permettant de caractériser en enceinte climatique les performances des bétons. Ils constituent la méthode de référence :
 - Essai de gel dans l'air - dégel dans l'eau, selon la norme NF P18-425 (durée : 3,5 mois),
 - Essai de gel dans l'eau - dégel dans l'eau, selon la norme NF P18-424 (durée : 3,5 mois),
 - Essai de gel en présence de sels (écaillage), selon la norme XP P18-420 (durée : 3 mois).
- Un indicateur de substitution aux 2 essais de gel interne, permettant la validation rapide (environ 7 j) de la résistance au gel interne (au sens de la caractéristique interne G) pour les bétons formulés avec un adjuvant entraîneur d'air :
 - Facteur d'espacement des bulles d'air, selon la norme XP P18-465.
- Un indicateur rapide permettant de s'assurer sur chantier, à la livraison du béton, que la teneur en air occlus reste compatible avec les valeurs ayant permis de valider la composition à l'issue des épreuves d'étude et de convenance :
 - Teneur en air, méthode de la compressibilité, selon la norme NF EN 12350-7

Le choix entre les deux types d'essais de gel interne s'effectue de la manière suivante, en prenant en compte le type de gel et le niveau de saturation en eau :

		Type de gel	
		Modéré	Sévère
Saturation en eau	Modérée		NF P18-425
	Forte	NF P18-425	NF P18-424

Dans le cas général, il n'est pas utile de prescrire en même temps la réalisation d'un essai de gel interne et la détermination du facteur d'espacement des bulles d'air pour les bétons formulés avec un entraîneur d'air et répondant aux prescriptions (matériaux et limites de composition) du guide UGE de 2021.

Un descriptif simplifié des caractéristiques de chaque essai est proposé dans le tableau de l'annexe B6 des Recommandations (UGE, 2021).

Est-il obligatoire d'utiliser un adjuvant entraîneur d'air pour les bétons G ou G+S ?

Oui, sauf pour certains bétons ayant une classe de résistance en compression inférieure à C50/60 et les bétons projetés.

Les bétons avec une classe de résistance en compression supérieure ou égale à C50/60 ayant une matrice plus fermée, ils sont moins sensibles aux dégradations liées au gel/dégel. Pour ce type de béton, il est possible de formuler sans air entraîné, ce qui permet d'obtenir plus facilement les résistances visées et de mieux résister au transfert des chlorures. Dans ce cas, les performances devront alors obligatoirement être validées en enceinte climatique (détermination du Lbarre ou de la teneur en air inadaptée).

Dans le cas d'un béton G, les délais de validation de formules sans adjuvant entraîneur d'air sont alors considérablement allongés (3,5 mois pour le gel interne après les études et convenances contre environ 7 jours pour le Lbarre).

Dans le cas d'un béton G+S, le délai de validation de formules sans adjuvant entraîneur d'air (gel interne : durée de 3,5 mois ; écaillage : durée de 3 mois) reste sensiblement le même que pour une formule avec adjuvant entraîneur d'air (facteur d'espacement : durée d'environ 1 semaine ; écaillage : durée de 3 mois) car il faut réaliser l'essai d'écaillage dans les deux cas.

En cas d'utilisation de microbilles plastiques compressibles en substitution d'un adjuvant entraîneur d'air pour la prévention au gel, la validation de la composition du béton devra être réalisée sur la base d'essais en enceinte climatique. En effet les mesures de type facteur d'espacement ou teneur en air ne permettent pas de valider les compositions. La démarche de validation est présentée dans son ensemble en annexe A5 des Recommandations (UGE, 2021).

Les essais sur béton projeté sont-ils les mêmes que ceux utilisés pour les bétons coulés en place ?

L'essai de détermination du facteur d'espacement des bulles d'air n'est généralement pas adapté à ce type de béton. La résistance au gel sera donc évaluée à partir des essais de durabilité au gel interne (NF P18-424 ou NF P18-425).

Les essais d'écaillage seront réalisés sur face sciée, l'irrégularité de la surface de béton projeté rendant illusoire la possibilité de maintenir une couche de saumure d'épaisseur constante pendant l'essai. Les seuils de conformité sont adaptés en conséquence : cf. § A6.5 des Recommandations (UGE, 2021).