

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, est de la responsabilité du maître d'ouvrage.

Les niveaux de gel et de salage, les classes d'exposition 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 (LCPC - 2003).**

Pour l'application des Recommandations (LCPC-2003) :

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 : [...].

Les Recommandations (LCPC-2003) doivent être prescrites dans les pièces du marché pour être applicables.

Note : les Recommandations (LCPC-2003) sont actuellement en cours de révision pour intégrer les évolutions du contexte normatif. La publication est prévue en 2019.

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).

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...)
- ...

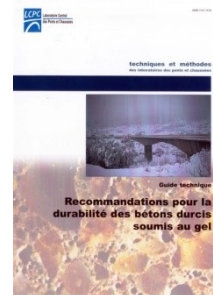
Les parties d'ouvrages enterrées à plus de 1 m de profondeur ne sont en général pas concernées.

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 (LCPC-2003)**.

Des adaptations, dues à l'évolution de la définition des classes d'exposition, doivent être prises en compte pour la définition des caractéristiques complémentaires G et G+S. Elles sont exposées dans le tableau 1.



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.
- ASTM C457-98. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete [dit « essai de détermination du facteur d'espacement des bulles d'air » ou « Lbarre »].

PRINCIPE GÉNÉRAL DE PRÉVENTION AU GEL/DEGEL

La démarche de prévention vis-à-vis de la durabilité au gel/dégel peut passer par la définition d'une caractéristique complémentaire :

- 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.

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...), le rédacteur du CCTP peut renforcer ces dispositions, en garantissant la résistance au gel/écaillage par :

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

Il est alors possible de renforcer les prescriptions des classes d'exposition XF3 et XF4 par l'ajout d'une caractéristique complémentaire G ou G+S. 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.

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

Niveau de salage \ Niveau de gel	Salage peu fréquent ou aucun salage	Salage fréquent	Salage très fréquent
Gel faible ou modéré pour les éléments très exposés aux risques d'écaillage ¹⁾	XF1	XF2	XF4 (G+S)
Gel faible ou modéré pour les autres éléments	XF1	XF2	XF2
Gel sévère	XF3 (G)	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

¹⁾ Les éléments très exposés aux risques d'écaillage sont ceux qui présentent des surfaces horizontales soumises aux stagnations d'eau et aux projections directes de sels de déverglaçage : corniches, solins d'ancrage des joints de chaussée, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue...

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].

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 LCPC 2003
	études et convenances spécifiques. renforcement exigences sur matériaux, résistance en compression et limites de
	teneur en air (NF EN 12350-7) ET Lbarre (ASTM C457-98) 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 LCPC 2003
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 (ASTM C457-98)</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 : $\Delta I/I \leq 400 \mu\text{m}/\text{m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,75$ ET écaillage : $\leq 600 \text{ g}/\text{m}^2$</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 : $\Delta I/I \leq 400 \mu\text{m}/\text{m}$ 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 : $\leq 600 \text{ g}/\text{m}^2$</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 : $\Delta I/I \leq 500 \mu\text{m}/\text{m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,60$</p> <p style="text-align: center;">ET</p> <p style="text-align: center;">écaillage : $\leq 750 \text{ g}/\text{m}^2$</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.</p> <p style="text-align: center;">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 : $\Delta I/I \leq 500 \mu\text{m}/\text{m}$ ET $(f_n/f_0)^2 \geq 0,60$</p> <p style="text-align: center;">ET :</p> <p style="text-align: center;">écaillage : $\leq 750 \text{ g}/\text{m}^2$</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 d'art : ponts routiers, autoroutiers ou ferroviaires
- bâtiments de prestige
- têtes de tunnels
- parkings
- remontées mécaniques
- pistes d'aéroports et parkings avions (bétons G uniquement*)
- stockages de sels
- chaussées béton
- ouvrages avec une durée d'utilisation de projet supérieure à 50 ans (et donc tous les ouvrages de génie civil)
- ...

* Le risque d'écaillage lié aux fondants non ioniques utilisés sur les pistes d'aéroports ne sont pas couverts par les Recommandations LCPC de 2003.

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 LCPC de 2003. Elles prennent en compte les aspects suivants :

- les granulats doivent être non gélifs
- des précautions sont à prendre sur le choix des liants
- les cendres volantes, qui peuvent gêner l'entraînement régulier de l'air, sont interdites.

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 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.

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 le risque de corrosion (si présence d'air entrainé),
- augmenter les risques de problèmes de résistance et de mise en œuvre (si air entrainé),
- 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).

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 ASTM C 457-98
- 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 LCPC de 2003.

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

Oui, sauf pour certains BHP et les bétons projetés.

Les BHP 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. 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 vs 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 (les mesures de type facteur d'espacement ou teneur en air ne permettent pas de valider la composition).