DIAGNOSTIC DE LA GÉLIVITÉ D'UN BÉTON

CONTEXTE

Généralités

Un béton exposé à des cycles de gel/dégel peut subir deux types de dégradation : la fissuration interne et l'écaillage. Ces deux modes de dégradation ne suivent pas les mêmes mécanismes. Ils n'apparaissent pas nécessairement en même temps, ni sur les mêmes bétons. Dans les deux cas, les détériorations du béton sont fonction de l'environnement dans lequel il est situé. Certains paramètres ont une influence notable comme les cycles de gel/dégel (nombre, amplitude, vitesse de refroidissement, etc.), les conditions de saturation en eau et la présence de sels de déverglaçage.

Le gel interne se traduit par un gonflement et une micro-fissuration dans la masse du béton. Des fragments de pâte cimentaire se détachent ensuite de la masse, engendrant une perte de cohésion du matériau. Apparaît alors une érosion rapide de la matrice cimentaire, éventuellement accompagnée de déchaussements des granulats. Cette détérioration conduit rapidement à une diminution des performances mécaniques et réduit la durée de vie de la structure en altérant la qualité du béton d'enrobage des armatures et la résistance à la pénétration des agents agressifs.

L'écaillage est un mode de détérioration de surface qui se produit en présence de sels de déverglaçage. Des fragments de pâte cimentaire se désolidarisent de la surface du béton exposé. Ce phénomène est localisé. Une fois amorcé, il se propage en surface et en profondeur. L'épaisseur de la détérioration peut atteindre quelques centimètres, conduisant ainsi au déchaussement de granulats. Cette dégradation présente surtout dans un premier temps un impact esthétique. Elle conduit cependant à terme à la réduction de l'épaisseur d'enrobage des armatures. La sécurité des usagers peut également être impactée en cas de chute de matériaux sur voie circulée.

Mécanismes de gel

Les caractéristiques micro-structurales de la pâte cimentaire, couplées avec les propriétés thermodynamiques de la phase liquide confinée, ont permis d'élaborer des modèles de dégradation. Leur confrontation avec l'expérience a révélé le rôle majeur du réseau de bulles d'air entraînées dans le béton durci, en particulier dans le cas du gel interne.

Le réseau poreux de la pâte cimentaire peut être classé en 3 grandes familles, selon le diamètre des pores, D_{pore} :

– les pores de gel de C S H : $10^{-3}\ \mu m < D_{pore} < 10^{-2}\ \mu m$
– les pores capillaires : $10^{-2}\ \mu m < D_{pore} < 1\ \mu m$
– les vides d'air entraîné : $5\ \mu m < D_{pore}$

La température de solidification de l'eau dans le réseau poreux s'abaissant avec le diamètre des pores (phénomène de surfusion capillaire), il en résulte que l'eau contenue dans les pores de gel de C S H ne peut pas geler aux températures considérées. Les vides d'air ne contiennent quant à eux que très peu d'eau, même dans le cas d'un béton saturé. La phase liquide susceptible de se transformer en glace se situe donc dans les pores capillaires.

Le gel provoque des circulations d'eau au sein du réseau poreux. Les pressions induites engendrent des efforts de traction sur la matrice cimentaire et sont à la source de la détérioration de la pâte cimentaire. Dès les années 1930, le rôle protecteur des vides d'air entraîné a été reconnu : ces cavités non saturées peuvent recevoir l'eau en excès et ainsi limiter les contraintes dans la matrice cimentaire. Une grande quantité d'air entraîné ne suffit cependant pas à augmenter la résistance au gel d'un béton : le nombre de bulles d'air entraîné et leur espacement maximal sont des caractéristiques majeures.

Ces aspects ont conduit à l'élaboration de différents modèles relatifs aux mécanismes de détérioration par le gel interne. Le premier d'entre eux, la théorie des pressions hydrauliques, a été établi par Powers [1] en 1949. Powers et Helmuth [2] en 1953 ont ensuite développé une théorie basée sur les pressions osmotiques, afin de pallier les limites du premier modèle. Les principes de ces deux modèles sont brièvement expliqués ci-dessous. Certains modèles complexes, intégrant des principes de micro-poromécanique et de thermodynamique comme la cryo-succion, sont actuellement en cours d'étude.

D'autres mécanismes ont été proposés pour l'étude de l'écaillage. Ces modèles ne permettent cependant pas d'expliquer l'apparition d'écaillage en présence d'agents non cristallisant tels que l'alcool.

Théorie des pressions hydrauliques

Ce modèle prend en compte l'augmentation de volume de 9% due à la transformation graduelle de l'eau libre en glace dans les capillaires, depuis les plus gros vers les plus petits. La concentration ionique s'élève dans la phase liquide restante et la température de solidification de l'eau s'abaisse.

La solution interstitielle restante est mise en pression par l'expansion de la glace. La pression hydraulique est fonction de la résistance à l'écoulement, décrite par Powers selon la loi de Darcy. Considérant que la pression pouvait être libérée lorsque l'eau trouve un exutoire (vide d'air), il a calculé la distance maximale (Lmax) que l'eau peut parcourir sans que la pression ne dépasse la résistance en traction de la matrice cimentaire.

Ces travaux ont permis de définir théoriquement la demi-distance maximale entre deux vides d'air (notion de facteur d'espacement) permettant d'éviter la dégradation d'une pâte cimentaire sous l'effet du gel. Ils ne rendent cependant pas compte du gonflement des bétons soumis à des températures négatives en présence de liquides n'augmentant pas de volume en gelant (exemple du benzène).

Théorie des pressions osmotiques

L'eau contenue dans la phase interstitielle d'un béton n'est pas pure. Comme précédemment évoqué, la formation de glace induit une élévation de la concentration ionique de l'eau non gelée. Cette augmentation locale de la concentration crée un gradient de concentration et donc un mouvement d'eau depuis la solution la plus diluée (pores de gel de C-S-H) vers la plus concentrée (pores capillaires). Ce cheminement d'eau génère une pression osmotique. L'apport d'eau moins chargée en ions dilue la solution interstitielle et augmente la température de solidification de l'eau. Il y a formation de glace supplémentaire, accompagnée d'une expansion d'environ 9%, ce qui provoque une augmentation de la pression d'eau dans les pores capillaires.

Paramètres influents

Les « Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel » de 2003 [3] fournissent des indications quant à l'influence de divers paramètres sur la résistance au gel et aux sels des bétons. S'ils permettent d'orienter le diagnostic, aucun d'entre eux n'est cependant suffisant pour identifier avec certitude la susceptibilité d'un béton à être dégradé par gel et/ou écaillage. La confirmation d'une telle possibilité requiert la réalisation d'essais de durabilité présentés ci-après.

Influence des caractéristiques de composition

Les principaux facteurs de risque sont résumés dans le tableau ci-dessous. Ces paramètres peuvent être facilement obtenus à partir des fiches de composition et des rapports d'essais relatifs aux bétons considérés.

critère		facteur de risque	
ciment	classe vraie	< 42,5	
	nature	CEM III à CEM V	
	dosage	< 385 kg/m3 (pour des granulats avec Dmax=20 mm)	
addition	nature	présence de cendres volantes dans le ciment ou en addition[1]	
granulats	gélivité	granulats gélifs[2]	
sable	teneur en fines	>10%, en prenant en compte les additions utilisées comme correcteurs granulométriques	
adjuvant	entraîneur d'air[3]	béton ordinaire (fc < 50 MPa) formulé sans utilisation d'agent entraîneur d'air ou ayant une teneur en air occlus inférieure à 4%	
porosité	rapport Eeff/Leq	gel interne	> 0,50
		écaillage	> 0,45
performance mécanique	résistance en compression	gel interne	< 30 MPa
		écaillage	< 35 MPa
essais de durabilité[4]	gel interne	facteur d'espacement > 300 µm $\Delta\varepsilon$ > 500 µm/m et $f^2/f0^2$ < 60%	
	écaillage	E > 750 g/m²	

Influence de l'environnement de la pièce

Les pathologies liées au gel sont fortement dépendantes :

– des cycles de gel-dégel (amplitude, fréquence, vitesse de refroidissement, etc.) ;
– de la présence de sels de déverglaçage (salage de la route, ruissellements d'eau salée, projections de saumures par la circulation automobile, etc.) ;
– du degré de saturation en eau (humidité).

D'un point de vue pratique, les deux premiers aspects peuvent être évalués à travers les notions de « niveau de gel » et de « niveau de salage ». Une prise de contact auprès des stations météorologiques de proximité et de l'organisme assurant la viabilité hivernale du secteur concerné peut être utile, notamment pour intégrer des particularités locales (micro-climats, effets de site), non prises en compte par les cartes telles que les cartes de zones de gel et de zones de salage de la norme NF EN 206/CN. Le degré de saturation en eau est apprécié qualitativement.

[1] Du fait de la présence d'imbrûlés, l'utilisation de cendres volantes peut diminuer l'efficacité des adjuvants entraîneurs d'air.

[2] Les critères sont définis dans les « Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel ».

[3] L'utilisation des adjuvants entraîneurs d'air ayant été systématisée à partir des années 1990, l'obtention de l'année de construction de l'ouvrage peut constituer une indication précieuse.

[4] Ces seuils correspondent aux valeurs retenues pour la réalisation d'ouvrages neufs à partir d'essais de performance. En l'absence de recul sur des pathologies d'ouvrages dégradés, le franchissement de ces seuils doit donc être interprété comme un indicateur d'un risque de dégradation lié au gel ou à l'écaillage.

Niveau de gel

Le niveau de gel est défini de la manière suivante par les « Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel » [3] :

– gel sévère : plus de 10 jours par an avec température < -10°C
– gel faible : moins de 3 jours par an avec température < -5°C
– gel modéré : entre faible et sévère

Le fascicule de documentation FD P 18-326 fixe les niveaux de gel à utiliser par canton et éventuellement en fonction de l'altitude pour les zones de montagne. Une consultation des données météorologiques auprès de la station la plus proche est également envisageable.

Les bétons enterrés de plus de 1 m ne sont pas concernés par les pathologies liées au gel.

Niveau de salage

Le niveau de salage pour les itinéraires structurants est défini de la manière suivante par les « Recommandations pour la durabilité des bétons soumis au gel » [3] :

– salage peu fréquent : $n < 10$ (H1)
– salage fréquent : $10 \leq n < 30$ (H2)
– salage très fréquent : $n \geq 30$ (H3 et H4)

avec n = nombre de jours de salage par an

En première approche, on peut utiliser la carte de salage présentée par la norme NF EN 206/CN. Cette carte, qui constitue une recommandation du niveau de salage à appliquer sur la base des seules données climatiques, peut cependant être éloignée du niveau de salage réellement pratiqué.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

Afin d'évaluer les facteurs de risque de dégradation par le gel, on identifiera dans le dossier de l'ouvrage les éléments utiles au diagnostic, à savoir :

– les paramètres climatiques ;
– les paramètres de composition du béton ;
– les indications éventuelles relatives à l'environnement immédiat (projection de saumures, humidité, etc.).

Il s'agit alors d'essayer de répondre chronologiquement aux deux questions suivantes :

– L'environnement est-il agressif au sens des pathologies liées au gel et aux sels ?
– La composition du béton est-elle adaptée à ce type d'environnement ?

Le facteur de risque lié à l'environnement de la pièce peut être apprécié au moyen du tableau suivant :

facteur de risque	salage peu fréquent ou aucun salage	salage fréquent	salage très fréquent
gel sévère	gel	gel et écaillage	gel et écaillage
gel modéré sur éléments très exposés au risque d'écaillage[5]	faible	écaillage[6]	écaillage
gel modéré sur autres éléments	faible	faible	faible
gel faible	nul ou quasi-nul[7]		

Le niveau de saturation en eau du béton doit être considéré comme un facteur aggravant.

[5] Il s'agit des surfaces horizontales soumises aux stagnations d'eau et aux projections directes des sels et des surfaces verticales directement soumises aux projections ou ruissellements de saumure.

[6] Cela concerne essentiellement les bétons formulés sans air entrainé.

[7] Dans le cas où le risque est nul ou quasi-nul, on applique les règles de gestion courante des ouvrages.

ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE

L'objet de cette étape est d'identifier sur site les conditions locales et les symptômes pouvant suggérer l'existence d'une dégradation des ouvrages par le gel. Ceux-ci peuvent être résumés dans le tableau ci-dessous.

paramètres	gel interne	écaillage
localisation	global	localisé aux surfaces exposées : – surfaces verticales subissant directement des projections ou ruissellements de saumures ; – surfaces horizontales soumises aux stagnations d'eau et aux projections directes de sels/saumures.
dégradation	gonflement, fissuration, détachements de fragments de pâte, déchaussement de granulats	détachements de fragments de pâte, déchaussement de granulats
propagation	dans la masse	propagation en surface et en profondeur à partir de la surface exposée
environnement	cycles de gel/dégel humidité	cycles de gel/dégel humidité présence de fondants

Il convient également d'évaluer l'importance de la dégradation par rapport à la criticité de la pièce. Il importe ainsi de vérifier si les dégradations constatées engagent :

– la résistance structurelle de l'ouvrage ;
– la sécurité des usagers (ancrages des dispositifs de retenue, chute de matériaux sur la voie franchie, etc.).

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Objectif

L'environnement étant réputé agressif et les désordres constatés étant compatibles avec une problématique de gel, il s'agit à présent de vérifier si l'on est en présence d'un béton sensible à ce type d'environnement. Les auscultations à envisager consistent donc à prélever des échantillons de béton et à les soumettre à l'essai de performance adapté.

Les essais habituellement utilisés en travaux neufs sont utilisés pour la caractérisation des bétons existants soumis au gel et sont décrits dans le tableau ci-dessous.

pathologie	essai	fiche d'auscultation	corps d'épreuve
gel interne	détermination au microscope de la teneur en pores et des paramètres du système de pores dans le béton durci	A1-6	2 plaques 10*10 cm
	essai de gel sur béton durci (gel dans l'air – dégel dans l'eau) dit « essai de gel modéré »	A1-7	3 prismes 10*10*40 cm
	essai de gel sur béton durci (gel dans l'eau – dégel dans l'eau) dit « essai de gel sévère »	A1-7	3 prismes 10*10*40 cm
écaillage	essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline	A1-8	4 cubes 15*15*15 cm

Dans le cas d'un diagnostic, il est souvent malaisé de prélever de grandes quantités de matériaux. Dans la mesure où il s'agit d'orienter le diagnostic vers les causes probables des pathologies, les adaptations décrites ci-dessous peuvent être envisagées.

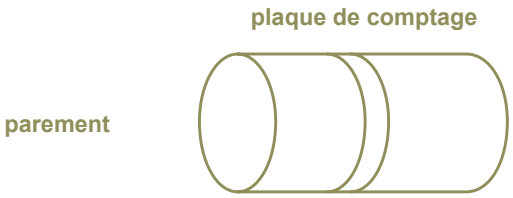
ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Carottage

La méthodologie de prélèvement doit être calquée sur celle décrite dans la fiche d'auscultation A1-1 qui se base sur la norme NF EN 12504-1. Dans la mesure où les carottes ne sont pas destinées à des essais de résistance en compression, leurs dimensions sont uniquement dictées par la possibilité d'obtenir des corps d'épreuves aux dimensions requises par sciage. Un élancement 2 est néanmoins souhaitable pour faciliter leur extraction. Elles doivent impérativement être prélevées dans des zones issues du même coulage que les bétons visuellement dégradés. Il est préférable que les corps d'épreuves obtenus après sciage soient dénués d'armatures.

Détermination du facteur d'espacement

Un examen simple à la loupe binoculaire, réalisé sans comptage, permet de déterminer si le béton a été fabriqué en utilisant un adjuvant entraîneur d'air. Si tel est le cas, un comptage complet au sens de l'ASTM C 457-98 peut être envisagé afin de vérifier si le réseau de bulles d'air est suffisant pour assurer une bonne protection du béton vis-à-vis du gel pur. Dans le cas d'un béton ordinaire ($f_c < 50$ MPa), l'absence d'air entraîné ou l'obtention d'un mauvais facteur d'espacement doit orienter le diagnostic vers la possibilité d'une dégradation liée au gel. Dans les cas limites ou dans le cas d'un BHP (Béton à Haute Performance) fabriqué sans entraîneur d'air, une confirmation peut être apportée par la réalisation d'un essai en enceinte de gel/dégel (voir ci-après). La détermination du facteur d'espacement peut être réalisée à partir d'une carotte de diamètre 100 mm. Cette dernière doit permettre de prélever un ou plusieurs corps d'épreuve d'au moins 15 à 20 mm d'épaisseur, après avoir éliminé les 2 premiers centimètres en contact avec le parement (peau du béton). Le comptage peut alors être réalisé sur des sections circulaires, à condition de prévoir des adaptations (utilisation de plus de 2 plaques, faible diminution de l'espacement entre les lignes, augmentation du nombre de points par ligne, etc.) permettant de conserver le nombre de points exigé par la norme (2*1500 points). Il est préférable de réaliser des corps d'épreuves à partir de 2 carottes distinctes pour avoir une meilleure représentativité de la dispersion du réseau de bulles d'air.



Des essais basés sur l'utilisation de la norme NF EN 480-11 « Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 11 : détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci » sont également envisageables.

Essai de gel interne

Dans la mesure du possible, l'essai est réalisé à partir de carottes de diamètre 140 mm qui permettent de confectionner des corps d'épreuve de dimensions normalisées. Dans la pratique, pour des ouvrages existants, ces dimensions sont excessives et il est loisible de prélever des carottes de diamètre 100 mm de façon à confectionner des prismes 7x7x28. Il importe alors d'adapter les modes opératoires d'essais de manière à garantir la nature des cycles thermiques réellement appliqués au niveau du cœur du corps d'épreuve (répartition des masses de béton dans les enceintes, paramétrage des cycles tenant compte de la dimension réduite des corps d'épreuve, etc.) et les hauteurs de recouvrement d'eau.

L'essai à pratiquer est choisi en fonction du niveau de gel :

– gel modéré (quel que soit le degré de saturation) ou gel sévère avec saturation modérée en eau : essai de gel sur béton durci (gel dans l'air – dégel dans l'eau)
corps d'épreuve : prisme ou carotte
– gel sévère avec forte saturation en eau : essai de gel sur béton durci (gel dans l'eau – dégel dans l'eau)
corps d'épreuve : prisme ou carotte
Les mesures à réaliser sont les suivantes :

– abaissement de la fréquence de résonance (non gélif si $f^2/f0^2 > 60\%$), traduisant l'évolution du niveau de fissuration interne en cours d'essai ; prévoir un élancement des corps d'épreuve supérieur à 2 pour la bonne réalisation des mesures ;
– gonflement relatif si le corps d'épreuve peut être instrumenté de plots de mesures.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Écaillage

L'essai est préférentiellement réalisé sur des carottes de surface minimale 180 cm² (diamètre de la carotte : 150 mm). Pour la validité des résultats, la norme impose de réaliser un minimum de 4 carottes ; ces prélèvements pouvant être pénalisants pour la structure, leur nombre est à apprécier en fonction des enjeux (étude de diagnostic ou expertise judiciaire) et de la localisation de l'ensemble des prélèvements. Ces carottes devront être prélevées dans des zones présentant une même qualité de surface. Elles doivent permettre d'extraire par sciage des corps d'épreuve de 75 mm de hauteur. La face exposée à la saumure pendant l'essai (face en parement de la structure) doit être intacte.

Pour l'interprétation des essais de gel interne et d'écaillage, il convient de prendre en compte que le béton testé a déjà subi un certain nombre d'années de cycles de gel-dégel au cours de son existence, ces cycles étant moins sévères que ceux pratiqués pendant les essais.

Traitement

Dans le cas d'un béton dégradé par le gel interne, aucune réparation n'est envisageable et la solution est souvent la démolition/reconstruction des zones concernées. La mise en place d'une protection vis-à-vis des venues d'eau est à prévoir pour retarder l'arrivée des désordres sur les parties d'ouvrage non encore atteintes.

Dans le cas d'un béton susceptible d'être dégradé par écaillage, l'utilisation de produits et systèmes de protection (NF EN 1504-2 et GA P18-902) est envisageable. Il convient toutefois d'éviter de piéger l'eau à l'intérieur de la pièce en béton. Le choix du type de produit et la méthodologie de validation sont décrits dans le guide LCPC/Sétra de décembre 2002 [4] « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement » et dans la norme NF P95-103. Il est possible de limiter l'évolution des désordres en limitant les venues d'eau et de saumure.

RÉFÉRENTIEL

[1] Powers T.-C., (1949). The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete. Proceedings of the Highway Research Board, PCA Bulletin 33, Portland Cement Association, Skokie Il, 29, 184- 211.

[2] Powers T.-C. and Helmuth R.-A., (1953). Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste. Proceedings of the Highway Research Board, PCA Bulletin 46, Portland Cement Association, Skokie Il, 32, 285-297.

[3] LCPC, Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Les collections du LCPC, techniques et méthodes. 167p, décembre 2003.

[4] LCPC / Sétra, Protection des bétons par application de produits à la surface du parement. Guide technique.99p. Décembre 2002.

Documents normatifs :

NF EN 206/CN de décembre 2014. Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206.

FD P 18-326 / Béton - Zones de gel en France.

NF EN 480-11 / Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 11 : détermination des caractéristiques des vides d'air dans le béton durci.

NF EN 1504-2 / Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le béton.

NF EN 12504-1 Essais pour béton dans les structures – Partie 1 : carottes - prélèvement, examen et essais en compression.

GA P 18-902 / Guide d'application - Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil.

NF P 95-103 / Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Traitement des fissures et protection du béton - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.

XP P 18 420 / Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.

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.

ASTM C 457-98 / Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 1998.

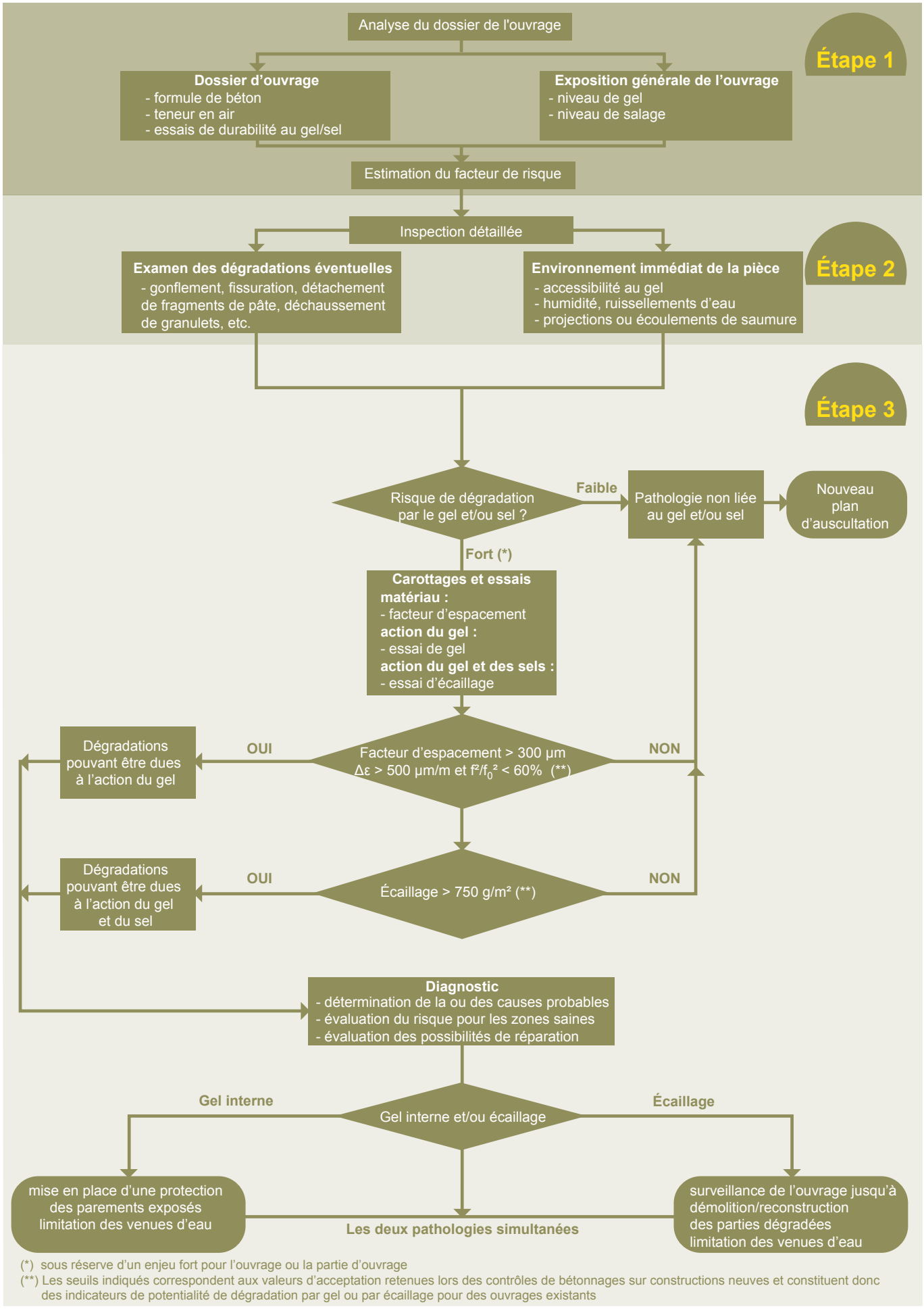
Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

- A1-1 Carottage du béton
- A1-6 Mesure du facteur d'espacement L d'un béton
- A1-7 Essai de gel interne d'un béton
- A1-8 essai d'écaillage d'un béton

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel résume la méthodologie du diagnostic en visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre.

D1-2 : DIAGNOSTIC DE LA GÉLIVITÉ D'UN BÉTON



(*) sous réserve d'un enjeu fort pour l'ouvrage ou la partie d'ouvrage

(**) Les seuils indiqués correspondent aux valeurs d'acceptation retenues lors des contrôles de bétonnages sur constructions neuves et constituent donc des indicateurs de potentialité de dégradation par gel ou par écaillage pour des ouvrages existants