

Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés

>>> LES NOUVEAUX TEXTES NORMATIFS RELATIFS AUX OUVRAGES EN BÉTON

PRENNENT EN COMPTE LA DURABILITÉ, EN S'APPUYANT SUR LA NOTION

DE CLASSE D'EXPOSITION. CES CLASSES TRADUISENT LES ACTIONS DUES

À L'ENVIRONNEMENT AUXQUELLES LE BÉTON ET LES ARMATURES DE L'OUVRAGE

OU DE CHAQUE PARTIE D'OUVRAGE VONT ÊTRE EXPOSÉS PENDANT LA DURÉE

DE SERVICE DE LA STRUCTURE.

LES CLASSES D'EXPOSITION PERMETTENT AINSI D'OPTIMISER LA FORMULATION

DES BÉTONS ET LA CONCEPTION DES OUVRAGES EN VUE DE LEUR DURABILITÉ.

SB-OA 2010-3



→ **En mer**

ou à moins de 100 m de la côte

p.03



→ **Littoral**

à moins de 1 km de la côte

p.04



→ **Gel faible**

ou modéré

p.05



→ **Gel sévère**

p.06

→ Des classes d'exposition conformes à l'Eurocode et à la norme Béton NF EN 206-1

Depuis le 1^{er} avril 2010, les Eurocodes s'imposent comme normes pour les calculs des structures, et en particulier pour les structures en béton. Ces normes de conception sont constituées du texte de la norme européenne et de l'Annexe Nationale correspondante, pour son application en France. Elles sont cohérentes avec l'application de la norme NF EN-206-1.

Pour assurer une durabilité satisfaisante des constructions, c'est aux maîtres d'ouvrage et à leurs maîtres d'œuvre de définir, dès le stade de conception, outre la durée d'utilisation de projet en cohérence avec les dispositions de la norme NF EN 1990, les classes d'exposition traduisant les attaques et risques de corrosion que subiront chaque partie d'ouvrage au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Le présent document résulte du travail du groupe créé au sein de l'École Française du Béton afin de réaliser un guide pour aider les rédacteurs de cahiers des charges à choisir les classes d'exposition pour différentes catégories d'ouvrages ou de constructions.

Ouvrages visés

Les ouvrages visés par les tableaux ci-après sont les tunnels routiers creusés, ainsi que les galeries. Pour les ouvrages de têtes de type "casquettes", on se reportera au fascicule "Tranchées couvertes"; pour les bâtiments d'exploitation et locaux techniques, au fascicule "Bâtiments"; pour les ouvrages de têtes armés, étanchés et remblayés, voir note 4 en page 7. La description des ouvrages ou parties d'ouvrage utilisée dans les tableaux ci-après ne préjuge pas de leur mode de réalisation (coulé en place ou préfabriqué). Cependant, pour les caniveaux hydrauliques d'une part, les regards et boîtes de branchement et d'inspection d'autre part, lorsqu'ils sont préfabriqués en usine, il y a lieu de faire référence à la norme de produit (NF EN 1433 d'une part, et NF EN 1917 et NF P 16-346-2 d'autre part) pour décrire les actions liées à l'environnement et en déduire les spécifications associées.

Remarques préliminaires

Les classes d'exposition conditionnent aussi bien la composition du béton que l'enrobage des armatures

métalliques pour les parties armées. Cette remarque permet de mieux comprendre la logique retenue pour le découpage en parties d'ouvrage.

Pour tous les tableaux, les classes d'exposition indiquées supposent une mise en œuvre correcte dans le respect des règles de l'art. Une étanchéité étant prévue en revêtement en tunnel, cette dernière est supposée être mise en place correctement et être pleinement efficace.

En aucun cas, un défaut de mise en œuvre n'est pris en compte à la conception, par exemple, en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement. Ceci couvre le cas des réparations par coques indépendantes d'étanchement et de revêtement en béton projeté.

De la même manière, les classes indiquées ne tiennent pas compte des défauts d'entretien quelquefois constatés. Il est rappelé notamment que l'évacuation des eaux doit être bien conçue et, le cas échéant, entretenue pendant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage, et que le défaut d'entretien ne doit pas être pris en compte à la conception, par exemple en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement.

Mode d'emploi des tableaux

L'aide au choix des classes d'exposition est déclinée, pour les classes d'exposition liées aux risques de carbonatation, agression par les chlorures, gel-dégel et attaques chimiques, en quatre tableaux (1 à 4 ci-après) portant en lignes les parties d'ouvrages et en colonnes les risques considérés, avec pour certains risques différents niveaux de sévérité correspondant à des sous-colonnes. Les parties d'ouvrages peuvent concerner non seulement des éléments ayant une cohérence constructive, mais également des parois et parties de parement cohérentes en termes d'exposition aux agressions extérieures.

Ces tableaux correspondent à quatre zones d'environnement (liées notamment à la localisation géographique de l'ouvrage) exclusives pour la France métropolitaine et la plupart des D.O.M./T.O.M. La définition de ces zones fait référence en particulier à la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1, en termes de distance à la côte et de sévérité du gel. Pour les quelques territoires soumis à la fois à un environnement maritime et au gel sévère, il convient d'utiliser les indications des tableaux 1 ou 2 liés à l'environnement maritime pour

les classes d'exposition XC et XS, et celles du tableau 4 lié à l'environnement en zone de gel sévère pour les autres classes, notamment XD et XF. Dans ces tableaux, le tiret "-" indique que l'agression en question n'est pas à prendre en compte pour la partie d'ouvrage considérée.

Précisions sur le gel et le salage

En application de la clause 4.2 (2) de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-1-1, le choix de la classe XD1, XD2 ou XD3 se réfère non seulement à l'effet aggravant des cycles d'humidification / séchage, mais également à la fréquence de salage des chaussées. Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. Par analogie avec les dispositions issues de l'annexe nationale de la norme NF EN 1992-2, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 mètres (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée peuvent être considérées comme exposées ou très exposées aux projections de sels, selon la fréquence du salage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties d'ouvrages peuvent ne pas être exposées aux effets du salage, on considèrera alors pour ces parties d'ouvrages la colonne "salage peu fréquent".

On considère en général pour un ouvrage enterré que l'influence de l'environnement extérieur (effet du gel sur les parties non enterrées, des sels marins, du salage s'il est appliqué sur l'itinéraire en dehors de l'ouvrage considéré, etc.) peut se faire sentir jusqu'à une distance de 200 mètres à partir des têtes, parfois moins, parfois plus selon la topographie particulière.

Les parties enterrées (en contact avec le sol en profondeur) sont en général considérées comme protégées du risque de gel, sauf dans les zones de gel sévère à proximité des têtes où une analyse spécifique doit être conduite. Par ailleurs, la possibilité de ne pas prendre en compte le gel ou de le faire à un moindre degré, en section courante, n'est pas intégrée dans les tableaux et doit être étudiée spécifiquement. En effet, seule la réduction des effets du salage en section courante est prise en compte dans les tableaux. ■

Tableau 1 - Tunnels routiers creusés situés en mer, ou à moins de 100 m de la côte
(ou jusqu'à 500 m de la côte, suivant la topographie particulière, lorsque les parties aériennes sont soumises à un risque d'exposition aux embruns)

PARTIES D'OUVRAGE									
XC	XS	XD		XF ⁽⁹⁾		XA			
	(7)	A ⁽⁶⁾	B ⁽⁶⁾	A ⁽⁶⁾	B ⁽⁶⁾				
SOUTÈNEMENT ⁽¹⁾ ET REVÈTEMENT EN TUNNEL									
Intrados des parties non armées du revêtement : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾ • En section courante	- - -	- - -	- - -	XF1 XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site XF1	- - -			
Extrados des parties non armées du revêtement** :	-	-	-	-	-	-			
Intrados des parties armées du revêtement en tunnel ⁽⁸⁾ , sous face de la dalle de ventilation : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾ • En section courante	XC4 XC3	- -	XD3 XD1	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site XF1	- - -			
Extrados des parties armées du revêtement en tunnel ^{(8)*} :	XC2	-	-	XF1	XF1	-			
Intrados des zones non armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation :	-	-	-	XF1	XF1	-			
Intrados des zones armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation, face supérieure de la dalle de ventilation, cloisons de ventilation :	XC3	-	-	XF1	XF1	-			
Voussoirs préfabriqués armés ou fibrés (cas des ouvrages creusés au tunnelier) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾ : Intrados / Extrados • En section courante : Intrados / Extrados	XC4 / XC2 XC3 / XC2	- / - - / -	XD3 / - XD1 / -	XF1 / XF1 XF1 / XF1	XF2 / XF1 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF1	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau			
FONDACTIONS ET RADIER									
Parties non armées des fondations du revêtement :	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau			
Parties armées des fondations du revêtement :	XC2	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau			
Radier contre-vouté en tunnel (y compris fondations du revêtement) : Intrados / Extrados	XC2 / XC2	- / - Sauf si étanchéité	- / -	- / -	- / -	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité			
Béton du radier en galerie non circulée : Intrados / Extrados	XC3 / XC2	- / - Sauf si étanchéité	- / -	- / -	- / -	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité			
PLATEFORME									
Béton d'assise et de remplissage :	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau			
Béton d'assainissement (caniveaux et regards) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾ • En section courante	XC4 XC4	- -	XD3 ⁽⁸⁾ XD2 ⁽⁸⁾	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	Classe XA à définir (pour les regards siphonides)			
Revêtement de surface des trottoirs : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾ • En section courante	- -	- -	- -	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	- -			
Chambres de tirage (y compris tampons) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾ • En section courante	XC4 XC3	- -	XD3 ⁽⁸⁾ XD1 ⁽⁸⁾	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	- -			
REVÈTEMENT EN GALERIES NON CIRCULÉES ⁽⁹⁾									
Intrados des parties non armées du revêtement :	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-			
Extrados des parties non armées du revêtement :	-	XS1** sauf si étanchéité	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité			
Intrados des parties armées du revêtement :	XC3	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-			
Extrados des parties armées du revêtement :	XC2	XS1** sauf si étanchéité	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité			
* en présence d'une étanchéité ; ** XS1 correspond ici à un risque de ruissellement et d'infiltration de chlorures marins pour les parties enterrées. Ceci constitue une interprétation de la norme cohérente avec les pratiques actuelles pour les parties de bâtiment									

* en présence d'une étanchéité ; ** XS1 correspond ici à un risque de ruissellement et d'infiltration de chlorures marins pour les parties enterrées. Ceci constitue une interprétation de la norme cohérente avec les pratiques actuelles pour les parties de bâtiment

Tableau 2 - Tunnels routiers creusés situés à moins de 1 km de la côte (ou jusqu'à 5 km de la côte, suivant la topographie particulière)

lorsque les parties aériennes de ces ouvrages sont exposées à un air véhiculant du sel marin, mais pas directement aux embruns

PARTIES D'OUVRAGE					XC	XS	XD		XF ⁽⁹⁾		XA
A : sillage peu fréquent ; B : sillage fréquent					(7)		A ⁽⁸⁾	B ⁽⁸⁾	A ⁽⁸⁾	B ⁽⁸⁾	
SOUTÈNEMENT ⁽¹⁾ ET REVÈTEMENT EN TUNNEL											
Intrados des parties non armées du revêtement : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	-	XS1 XS1	-	-	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	XF1	XF1	-	-	-	-	-
Extrados des parties non armées du revêtement* :	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Intrados des parties armées du revêtement en tunnel ⁽⁹⁾ , sous face de la dalle de ventilation : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XC4 XC3	XS1 XS1	-	-	XD3 XD1	XF1 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-	-	-	-	-
Extrados des parties armées du revêtement en tunnel ⁽⁹⁾ * :	XC2	-	-	-	XF1	XF1	-	-	-	-	-
Intrados des zones non armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation :	-	-	-	-	XF1	XF1	-	-	-	-	-
Intrados des zones armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation, face supérieure de la dalle de ventilation, cloisons de ventilation :	XC3	-	-	-	XF1	XF1	-	-	-	-	-
Voussoirs préfabriqués armés ou fixés (cas des ouvrages creusés au tunnelier) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ ; Intrados / Extrados • En section courante : Intrados / Extrados	XC4 / XC2 XC3 / XC2	XS1 / XS1 XS1 / XS1	- / - - / -	XD3 / - XD1 / -	XF1 / XF1 XF1 / XF1	XF2 / XF1 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF1	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
FONDATIONS ET RADIER											
Parties non armées des fondations du revêtement :	-	XS1	-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Parties armées des fondations du revêtement :	XC2	XS1	-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Radier contre-voûté en tunnel (y compris fondations du revêtement) : Intrados / Extrados	XC2 / XC2	- / XS1 Sauf si étanchéité	- / -	- / -	- / -	- / -	-	-	-	-	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Béton du radier en galerie non circulée : Intrados / Extrados	XC3 / XC2	- / XS1 Sauf si étanchéité	- / -	- / -	- / -	- / -	-	-	-	-	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
PLATEFORME											
Béton d'assise et de remplissage :	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Béton d'assainissement (caniveaux et regards) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XC4 XC4	XS1 XS1	-	XD3 ⁽⁸⁾ XD2 ⁽⁸⁾	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-	-	-	-	Classe XA à définir (pour les regards siphonnés)
Revêtement de surface des trottoirs : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	-	XS1 XS1	-	-	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-	-	-	-	-
Chambres de tirage (y compris tampons) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XC4 XC3	XS1 XS1	-	XD3 ⁽⁸⁾ XD1 ⁽⁸⁾	XF1 XF1	XF2 XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-	-	-	-	-
REVÊTEMENT EN GALERIES NON CIRCULÉES ⁽¹⁰⁾											
Intrados des parties non armées du revêtement :	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-	-	-	-	-
Extrados des parties non armées du revêtement :	-	XS1 sauf si étanchéité	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Intrados des parties armées du revêtement :	XC3	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-	-	-	-	-
Extrados des parties armées du revêtement :	XC2	XS1 sauf si étanchéité	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
* en présence d'une étanchéité											

Tableau 3 - Tunnels routiers creusés situés à l'intérieur des terres en zone de gel faible ou modéré

PARTIES D'OUVRAGE		XC	XS	XD			XF ^(a)			XA
A : salage peu fréquent ; B : salage fréquent ; C : salage très fréquent				A ^(a)	B ^(a)	C ^(a)	A ^(a)	B ^(a)	C ^(a)	
SOUTÈNEMENT ^(a) ET REVÈTEMENT EN TUNNEL										
Intrados des parties non armées du revêtement :		-	-	-	-	-	XF1	XF2	XF4	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ^(a)		-	-	-	-	-	XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• En section courante		-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
Extrados des parties non armées du revêtement* :		-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
Intrados des parties armées du revêtement en tunnel ^(a) , sous face de la dalle de ventilation :		-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ^(a)		XC4	-	-	XD3	XD3	XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	XF4	-
• En section courante		XC3	-	-	XD1	XD1	XF1	XF1	XF1	-
Extrados des parties armées du revêtement en tunnel ^(a) , (en présence d'une étanchéité)		XC2	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
Intrados des zones non armées de la partie supérieure de la voûte		-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
Intrados des zones armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation, face supérieure de la dalle de ventilation, cloisons de ventilation :		XC3	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
Voussoirs préfabriqués armés ou fibrés (cas des ouvrages creusés au tunnelier) :		XC4 / XC2	- / -	- / -	XD3 / -	XD3 / -	XF1 / XF1	XF2 / XF1	XF4 / XF1	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
• Sur 200 mètres à partir des têtes ^(a) : Intrados / Extrados		XC3 / XC2	- / -	- / -	XD1 / -	XD1 / -	XF1 / XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF1	
• En section courante : Intrados / Extrados		-	-	-	-	-	-	-	-	-
FONDACTIONS ET RADIER										
Parties non armées des fondations du revêtement :		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Parties armées des fondations du revêtement :		XC2	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Radier contre-vouté en tunnel (y compris fondations du revêtement) : Intrados / Extrados		XC2 / XC2	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Béton du radier en galerie non circulée : Intrados / Extrados		XC3 / XC2	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
PLATEFORME										
Béton d'assise et de remplissage :		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Béton d'assainissement (caniveaux et regards) :		XC4	-	-	XD3 ^(a)	XD3 ^(a)	XF1	XF2	XF4	Classe XA à définir (pour les regards siphoniques)
• Sur 200 mètres à partir des têtes ^(a)		XC4	-	-	XD2 ^(a)	XD2 ^(a)	XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	
• En section courante		-	-	-	-	-	XF1	XF2	XF4	-
Revêtement de surface des trottoirs :		-	-	-	-	-	XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ^(a)		-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-
• En section courante		XC4	-	-	XD3 ^(a)	XD3 ^(a)	XF1	XF2	XF4	-
Chambres de tirage (y compris tampons) :		XC3	-	-	XD1 ^(a)	XD1 ^(a)	XF1	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	XF1 ou XF2 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ^(a)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
• En section courante		-	-	-	-	-	-	-	-	-
REVÈTEMENT EN GALERIES NON CIRCULÉES ^(a)										
Intrados des parties non armées du revêtement :		-	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-
Extrados des parties non armées du revêtement :		-	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Intrados des parties armées du revêtement :		XC3	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	-
Extrados des parties armées du revêtement :		XC2	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF1	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
* en présence d'une étanchéité										

Tableau 4 - Tunnels routiers creusés situés à l'intérieur des terres en zone de gel sévère

PARTIES D'OUVRAGE		XC	XS	XD			XF ⁽⁶⁾			XA
A : sautage peu fréquent ; B : sautage fréquent ; C : sautage très fréquent				A ⁽³⁾	B ⁽⁴⁾	C ⁽⁵⁾	A ⁽³⁾	B ⁽⁴⁾	C ⁽⁵⁾	
SOUTÈNEMENT ⁽¹⁾ ET REVÊTEMENT EN TUNNEL										
Intrados des parties non armées du revêtement :		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	XF4
• Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾		-	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• En section courante		-	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	-
Extrados des parties non armées du revêtement* :		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
Intrados des parties armées du revêtement en tunnel ⁽⁶⁾ :		XC4	-	-	XD3	XD1	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• sous face de la dalle de ventilation :		XC3	-	-	XD3	XD1	XF3	XF3	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾		-	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	-
• En section courante		-	-	-	-	-	XF3	XF3	XF3	-
Extrados des parties armées du revêtement en tunnel ^{(6)*} :		XC2	-	-	-	-	XF3 ou XF1	XF3 ou XF1	XF3 ou XF1	-
Intrados des zones non armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation :		-	-	-	-	-	XF3 ou XF1	XF3 ou XF1	XF3 ou XF1	-
Intrados des zones armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation, face supérieure de la dalle de ventilation, cloisons de ventilation :		XC3	-	-	-	-	XF3 ou XF1	XF3 ou XF1	XF3 ou XF1	-
Voussoirs préfabriqués armés ou fibrés (cas des ouvrages creusés au tunnelier) :		XC4 / XC2	- / -	- / -	XD3 / -	XD1 / -	XF3 / XF3	XF4 / XF3	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF3	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
• Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁷⁾ : Intrados / Extrados		XC3 / XC2	- / -	- / -	XD1 / -	XD1 / -	XF3 / XF3	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF3	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site / XF3	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
• En section courante : Intrados / Extrados		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
FONDATIONS ET RADIER										
Parties non armées des fondations du revêtement :		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Parties armées des fondations du revêtement :		XC2	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Radier contre-voûté en tunnel (y compris fondations du revêtement) :		XC2 / XC2	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Intrados / Extrados		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Béton du radier en galerie non circulée :		XC3 / XC2	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	- / -	Classe XA à définir pour l'extrados selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Intrados / Extrados		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
PLATEFORME										
Béton d'assise et de remplissage :		-	-	-	-	-	-	-	-	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau
Béton d'assainissement (caniveaux et regards) :		XC4	-	-	XD3 ⁽⁸⁾	XD2 ⁽⁸⁾	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	Classe XA à définir (pour les regards sphériques)
• Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾		XC4	-	-	XD3 ⁽⁸⁾	XD2 ⁽⁸⁾	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	Classe XA à définir (pour les regards sphériques)
• En section courante		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	Classe XA à définir (pour les regards sphériques)
Revêtement de surface des trottoirs :		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• En section courante		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
Chambres de tirage (y compris tampons) :		XC4	-	-	XD3 ⁽⁸⁾	XD1 ⁽⁸⁾	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁸⁾		XC3	-	-	XD3 ⁽⁸⁾	XD1 ⁽⁸⁾	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
• En section courante		-	-	-	-	-	XF3	XF4	XF3 ou XF4 selon la longueur du tunnel et la configuration du site	-
REVÊTEMENT EN GALERIES NON CIRCULÉES ⁽²⁾										
Intrados des parties non armées du revêtement :		-	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	-
Extrados des parties non armées du revêtement :		-	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité
Intrados des parties armées du revêtement :		XC3	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	-
Extrados des parties armées du revêtement :		XC2	-	-	-	-	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Parties des galeries débouchant à l'extérieur XF3	Classe XA à définir selon les analyses du sol et de l'eau sauf si étanchéité

* en présence d'une étanchéité

- ⁽¹⁾ : Le béton de soutènement projeté ou coulé est considéré comme provisoire. Il n'est pas pris en compte dans le dimensionnement du revêtement. On admettra donc qu'aucune exigence particulière liée à une classe d'exposition ne lui est imposée.
- ⁽²⁾ : Contrairement à la réalisation du tunnel lui-même où les règles de l'art françaises imposent la mise en place d'une étanchéité protégée par un revêtement définitif, dans le cas de la réalisation des galeries, il peut être tenu compte de la présence ou non de venues d'eau. Si aucune venue d'eau importante et continue n'est constatée, il est possible de réaliser un béton projeté définitif sans mise en place d'une étanchéité systématique. Le béton projeté fait alors office de revêtement définitif et des classes d'exposition doivent être définies. Il est à noter que d'après la norme NF EN 206-1, des exigences complémentaires ou différentes peuvent être données dans d'autres normes européennes spécifiques pour certains produits. C'est le cas notamment des bétons projetés. On se référera en particulier à la norme NF EN 14487-1 et -2 dont la mise en application est aujourd'hui effective.
- ⁽³⁾ : Les parties armées du revêtement sont : les corbeaux en présence d'une dalle de ventilation, les bases des piédroits en présence d'un radier contre-vouté, les anneaux des têtes, les zones armées des anneaux spécifiques : fixation des accélérateurs, présence de niches de sécurité et d'incendie, débouché des galeries en tunnel, etc.
- ⁽⁴⁾ : Les différentes parties armées des ouvrages de têtes, étanchés et remblayés sont traitées de la même manière que les parties armées des anneaux (courants).
- ⁽⁵⁾ : Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. En application de la norme NF EN 1992-2 et de son annexe nationale, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées (très) exposées aux projections de sels de déverglaçage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties peuvent ne pas être exposées, on considérera alors la colonne "salage peu fréquent".
- ⁽⁶⁾ : On considère en général pour un ouvrage enterré que l'influence de l'environnement extérieur (effet du gel sur les parties non enterrées, des sels marins, du salage s'il est appliqué sur l'itinéraire en dehors de l'ouvrage considéré, etc.) peut se faire sentir jusqu'à une distance de 200 mètres à partir des têtes, parfois moins, parfois plus selon la topographie particulière.
- ⁽⁷⁾ : En France, pour éviter l'attaque chimique du matériau béton dans le cas particulier de l'exposition à l'eau de mer, il est admis par le fascicule FDP 18-011, appelé par la norme NF EN 206-1, d'appliquer les prescriptions de composition de la classe XS1 (parties exposées à l'air véhiculant du sel marin et, par interprétation de la norme, à l'infiltration des chlorures marins pour les parties enterrées), XS2 (béton immergé en permanence) ou XS3 (béton en zone de marnage et d'exposition aux embruns) des tableaux NAF 1 ou 2 de la norme NF EN 206-1, que l'élément de béton soit armé ou non, et non les prescriptions de la composition de la classe XA3 qui résulterait de l'application du tableau 2 de la norme NF EN 206-1. Pour le cas d'ouvrages au contact d'eau de mer polluée ou mélangée à d'autres eaux de surface, par exemple, une analyse est à effectuer au cas par cas, vis à vis des attaques chimiques possibles.
- ⁽⁸⁾ : Pour ces ouvrages de durée d'utilisation de projet souvent inférieure à 50 ans on admet en France que la classe XD ne concerne que l'enrobage, les classes XF2 et XF4 couvrant les exigences liées au matériau dues à la présence des sels de déverglaçage.
- ⁽⁹⁾ : La possibilité de ne pas prendre en compte le gel ou tout du moins de le faire à un moindre degré en section courante, n'est pas intégrée dans les tableaux et doit être étudiée spécifiquement. En effet, seule la réduction des effets du salage en section courante est prise en compte dans les tableaux.

Prévention de la réaction sulfatique interne

Un cinquième tableau complète l'aide au choix des classes d'exposition. Il est associé à la prévention de la réaction sulfatique interne, en application du guide technique *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne* publié par le LCPC en août 2007. Ce guide précise en effet : "la norme NF EN 206-1 ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne, trois classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont introduites (...) et doivent être spécifiées

au CCTP pour chaque partie d'ouvrage. (...) Les spécifications définies (dans le guide en question pour la prévention de la RSI) devront être prises en compte en complément de celles imposées par la norme NF EN 206-1."

Par analogie avec la démarche de prévention de l'alcali-réaction, le niveau de prévention, et donc les précautions à mettre en œuvre, est associé non seulement à la classe d'exposition XH1, XH2 ou XH3, mais également au choix d'une catégorie d'ouvrage ou d'élément d'ouvrage, I, II ou III, qui relève de la responsabilité du maître d'ouvrage et dépend "de la nature de l'ouvrage, de sa destination,

des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur". A priori, les tunnels sont classés en catégorie III (conséquences inacceptables ou quasi-inacceptables). On peut cependant concevoir que selon les conditions d'exploitation de l'ouvrage et son caractère plus ou moins stratégique (trafic faible ou non faible, tunnel urbain ou non urbain, existence d'un itinéraire alternatif ou non), l'ouvrage ou tout du moins certaines parties puissent être classées en catégorie II (conséquences peu tolérables). C'est pourquoi les deux catégories de niveau de prévention figurent dans le tableau 5. ■

Tableau 5 - Tunnels routiers creusés : prévention de la réaction sulfatique interne

PARTIES D'OUVRAGE	XH (PRÉVENTION RSI)	NIVEAU DE PRÉVENTION RSI	
		Ouvrage courant (de catégorie II)	Ouvrage exceptionnel (de catégorie III)
SOUTÈNEMENT ⁽¹⁾ ET REVÊTEMENT EN TUNNEL			
Intrados des parties non armées du revêtement en tunnel : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XH3 XH2	Cs Bs	Ds Cs
Extrados des parties non armées du revêtement en tunnel : (en présence d'une étanchéité)	XH2	Bs	Cs
Intrados des parties armées du revêtement en tunnel ⁽³⁾ , sous face de la dalle de ventilation : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XH3 XH2	Cs Bs	Ds Cs
Extrados des parties armées du revêtement en tunnel ⁽³⁾ : (en présence d'une étanchéité)	XH2	Bs	Cs
Intrados des zones non armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation :	XH2	Bs	Cs
Intrados des zones armées de la partie supérieure de la voûte en présence d'une dalle de ventilation, face supérieure de la dalle de ventilation, cloisons de ventilation :	XH2	Bs	Cs
Voussoirs préfabriqués armés ou fibrés (cas des ouvrages creusés au tunnelier) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ : Intrados / Extrados • En section courante : Intrados / Extrados	XH3 / XH3 XH2 / XH3	Cs / Cs Bs / Cs	Ds / Ds Cs / Ds
FONDACTIONS ET RADIER			
Parties non armées des fondations du revêtement :	XH3	Cs	Ds
Parties armées des fondations du revêtement :	XH3	Cs	Ds
Radier contre-vouté en tunnel (y compris fondations du revêtement) : Intrados / Extrados	XH3 / XH3 sauf si étanchéité XH2	Cs / Cs ou Bs	Ds / Ds ou Cs
Béton du radier en galerie non circulée : Intrados / Extrados	XH1 / XH3 sauf si étanchéité XH2	As / Cs ou Bs	As / Ds ou Cs
PLATEFORME			
Béton d'assise et de remplissage :	XH3	Cs	Ds
Béton d'assainissement (caniveaux et regards) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XH3 XH3	Cs Cs	Ds Ds
Revêtement de surface des trottoirs : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XH3 XH2	Cs Bs	Ds Cs
Chambres de tirage (y compris tampons) : • Sur 200 mètres à partir des têtes ⁽⁶⁾ • En section courante	XH3 XH2	Cs Bs	Ds Cs
REVÊTEMENT EN GALERIES NON CIRCULÉES ⁽²⁾			
Intrados des parties non armées du revêtement :	XH1	As	As
Extrados des parties non armées du revêtement :	XH3 sauf si étanchéité XH1	Cs ou As	Ds ou As
Intrados des parties armées du revêtement :	XH1	As	As
Extrados des parties armées du revêtement :	XH3 sauf si étanchéité XH1	Cs ou As	Ds ou As

→ Bien spécifier les classes d'exposition : quel enjeu ?

Les classes d'exposition constituent, en complément de la durée d'utilisation de projet ("design service life"), la clé d'entrée de la durabilité des ouvrages en béton telle que prise en compte dans les normes actuelles : Eurocode 2, norme béton, norme d'exécution des structures en béton. Leur spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande. Qu'elle soit traitée de façon prescriptive ou au moins partiellement performantielle, la conception durable de l'ouvrage se trouve gouvernée par cette donnée d'entrée, afin de répondre à l'objectif consistant à s'assurer d'une durée probable de service contractualisée, sans réparation majeure, compte tenu des agressions et risques probables.

Si les classes d'exposition constituent depuis quelques années des concepts connus et mis en pratique parce que participant à la désignation du béton commandé et formulé en application de la norme NF EN 206-1, il est important de noter qu'elles sont aussi à utiliser :

- dès le stade du projet pour la détermination des enrobages (normes : NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 4) ;
- dès le stade du projet pour la maîtrise de la fissuration (normes : NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 7) ;
- et lors de la construction, pour préciser les spécifications d'exécution dont, par exemple, les classes de cure (norme : NF EN 13670).

Les visées spécifiques des différentes normes qui font référence à ces classes et la multiplicité des praticiens concernés par leur utilisation ont conduit à une nécessaire mise en commun des interprétations, de façon à aider à une spécification homogène et responsable des classes d'exposition, compte tenu des enjeux économiques liés à la durabilité des ouvrages concernés. Tel a été le travail du groupe de l'EFB animé par H. Thonier, s'appuyant pour les différents types d'ouvrages sur le travail des experts concernés. Si ces *Guides d'aide au choix des classes d'exposition* n'ont pas de statut officiel, ils constituent cependant une indication du

consensus technique actuel cohérent avec les niveaux d'exigence prescritifs et/ou performantiels actuellement associés à ces classes en lien avec les durées d'utilisation de projet de référence actuelles (100 ans pour les ouvrages d'art courants). Ils ont donc en quelque sorte valeur de règles de l'art.

De façon plus fondamentale, ces tableaux traduisent effectivement un état des connaissances et un retour d'expérience qu'un maître d'ouvrage ne peut plus ignorer :

- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par carbonatation du béton, qui concerne pratiquement toutes les structures à des degrés divers, la sévérité du risque étant associée à la fois à l'humidité environnante moyenne (pénétration du gaz carbonique maximale pour une humidité relative comprise entre 40 et 70 %), et à des apports d'eau liquide (intempéries, condensations), le retour d'expérience sur le patrimoine bâti confirmant les analyses et modèles issus de la recherche ;
- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par pénétration des ions chlore, d'origine marine ou non : la pénétration de ces ions est favorisée par les cycles d'humidification-séchage, ce qui explique le niveau maximal de prévention à adopter pour les zones de marnage, soumises aux projections d'embruns ou directement soumises aux projections contenant des sels de déverglaçage ;
- la prise en compte des risques d'attaque chimique du béton et d'attaque physique liée aux cycles de gel-dégel dont le nombre est amplifié par la concomitance des sels ;
- le cas échéant, la prise en compte du risque d'abrasion ;
- enfin, le risque accru induit par l'apport éventuel d'eau liquide (immersion, projections ou intempéries), ou d'humidité persistante, dans le cadre de la prévention des désordres dus aux réactions de gonflement du béton et notamment à la Réaction Sulfatique Interne.

Si un effort reste nécessaire pour chacun avant d'atteindre l'aisance parfaite dans l'emploi de ces classes,

on peut néanmoins affirmer que la cohérence désormais réelle entre l'ensemble des normes françaises et européennes sur le sujet constitue un atout pour exprimer de façon plus rationnelle l'ambition de durabilité d'un ouvrage et ses contraintes, et pour y répondre en mobilisant le meilleur des pratiques et possibilités en jouant tant sur le matériau béton que sur les dispositions d'enrobage et de ferrailage, la conception d'ensemble et de détail, les dispositifs de protection et la qualité de réalisation.

Dans tous les cas, l'enjeu est de favoriser de façon ouverte l'assurance de la qualité associée aux dispositions classiques liées à la durabilité, et aussi, en particulier dans les environnements sévères, l'émergence de variantes appropriées pour atteindre l'objectif de durabilité. ■

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, IFSTTAR

Un groupe de travail a été créé au sein de l'École Française du Béton afin de rédiger des guides destinés à faciliter le choix des classes d'exposition pour différentes catégories d'ouvrages ou de constructions.

Ce Groupe, piloté par Henry Thonier (EGF-BTP), est constitué de membres représentant l'Administration (IFSTTAR, CETMEF, CETU), les bureaux de contrôle (SOCOTEC, APAVE), les fédérations professionnelles (FFB, FNTP, EGF-BTP, UMGO), les entreprises (Eiffage, Bouygues), les organismes techniques professionnels (CERIB, Cimbéton).

La rédaction a été principalement assurée par Laetitia d'Aloïa (CETU), Jacques Cortade (consultant), Patrick Dantec (LRPC-Clermont), Mokhtar Daoudi (APAVE), Philippe Francisco (Cerib), Patrick Guiraud (Cimbéton), Wilfried Pillard (UMGO), Jean-Marc Potier (SNBPE), et pour les tableaux de ce fascicule par Laetitia d'Aloïa (CETU) et François Toutlemonde IFSTTAR (ex LCPC).