

DETERMINATION DE L'ENROBAGE DES ARMATURES

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

Chaque partie d'ouvrage peut être soumise sur ses **différentes faces** à des **classes d'exposition différentes** vis-à-vis du risque de corrosion.

Le rédacteur du CCTP doit donc, dans un **tableau spécifique** (distinct de celui prescrivant les classes d'exposition des bétons), préciser les classes d'exposition à prendre en compte pour la détermination de **l'enrobage de chaque face de chaque partie d'ouvrage**.

Exemple: pour un voile, les classes d'exposition pour déterminer l'enrobage de la face intérieure, et les classes d'exposition pour déterminer l'enrobage de la face extérieure.

Seul l'enrobage nominal est précisé sur les plans d'exécution, en tant que référence pour la fabrication et pour la pose des armatures.

➔ L'enrobage nominal est la somme de l'enrobage minimal nécessaire vis-à-vis de la durabilité établi selon les principes de la norme NF EN 1992-1-1 et d'une marge de sécurité pour tolérances d'exécution.

⚠ **La détermination des enrobages est de la responsabilité de l'entreprise.**

Leurs valeurs doivent être en cohérence avec l'enrobage minimal de la norme NF EN1992-1-1, et les éventuelles optimisations prévues (classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence, indicateurs de durabilité améliorés, contrôle de la qualité, nature des armatures...).

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

L'enrobage des armatures représente la distance entre la surface du béton et l'armature la plus proche (cadres, étriers, épingles, armatures de peau, etc.).

Il doit être suffisant pour garantir :

- La bonne **protection de l'acier contre la corrosion** : **DURABILITE**
- La bonne **transmission des efforts d'adhérence** béton armatures :

FONCTIONNEMENT DE LA STRUCTURE

- Une **résistance au feu** convenable du béton : **SECURITE**

PHILOSOPHIE DE L'ENROBAGE SELON L'EUROCODE 2

Les **recommandations** de l'EUROCODE 2 (norme NF EN 1992-1-1) en matière d'enrobage des bétons de structures sont **novatrices**.

Elles résultent d'un retour d'expérience sur la durabilité des ouvrages construits depuis plusieurs décennies et sur les recherches récentes en matière de protection des armatures vis-à-vis des risques de corrosion.

Elles visent, en conformité avec la norme NF EN 206/CN, à optimiser de manière pertinente la durabilité des ouvrages.

La valeur de l'enrobage peut ainsi être optimisée en particulier :

- Si l'on choisit un béton présentant une classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence (définie pour chaque classe d'exposition) **ou des valeurs d'indicateurs de durabilité améliorés par rapport aux seuils de base du FD P18-480** ;
- S'il existe un système de contrôle de la qualité ;
- Si l'on utilise des armatures inox.

L'EUROCODE 2 permet aussi de dimensionner l'ouvrage pour une durée d'utilisation de l'ouvrage supérieure en augmentant la valeur de l'enrobage.

Note: Il attire aussi l'attention sur les problèmes respectifs de fissuration du béton en cas d'enrobage nominal supérieur à 50 mm et de bétonnage pour des enrobages nominaux inférieurs à la dimension nominale du plus gros granulat.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DETERMINATION DE L'ENROBAGE

La détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte de façon détaillée :

- La **classe d'exposition** dans laquelle se trouve l'ouvrage (ou la partie d'ouvrage) et qui traduit les conditions environnementales
- La durée de service attendue (ou **durée d'utilisation du projet**)
- La **classe de résistance du béton** (ou les grandeurs associées à la **durabilité**)
- Le type de **système de contrôle qualité** mis en œuvre pour assurer la régularité des performances du béton et la maîtrise du positionnement des armatures
- La régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé
- Le **type d'armatures** (précontraintes ou non) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable) et d'éventuelles protections complémentaires contre la corrosion.
- La maîtrise du positionnement des armatures.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DETERMINATION DE L'ENROBAGE

L'enrobage minimal est défini dans la section 4 « Durabilité et enrobage des armatures » de la norme NF EN 1992-1-1

Il est donné par l'expression :

$$C_{\min} = \max \left[\begin{array}{c} C_{\min,b} \\ C_{\min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add} \\ 10 \text{ mm} \end{array} \right]$$

DETERMINATION DE L'ENROBAGE

Avec :

- $C_{min,b}$ enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armature) ;
- $C_{min,dur}$ enrobage minimal vis-à-vis de la classe d'exposition qui tient compte des conditions environnementales et vis-à-vis de la classe structurale qui dépend de la durée d'utilisation du projet ;
- $\Delta C_{dur,y}$ marge de sécurité (valeur recommandée 0) ;
- $\Delta C_{dur,st}$ réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'utilisation, par exemple, d'acier inoxydable ;
- $\Delta C_{dur,add}$ réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protections complémentaires.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

TOLERANCE D'EXECUTION

L'enrobage minimal doit être majoré pour tenir compte des tolérances pour écart d'exécution (ΔC_{dev}).

La valeur recommandée dans la NF EN 1992-1-1 est = 10 mm. Cette valeur peut être réduite sous réserve de conditions strictes de contrôle qualité à la fois sur la conception et l'exécution des ouvrages. Il est possible de la ramener à une valeur comprise entre 5 et 10 mm.

L'enrobage nominal est alors donné par la formule :

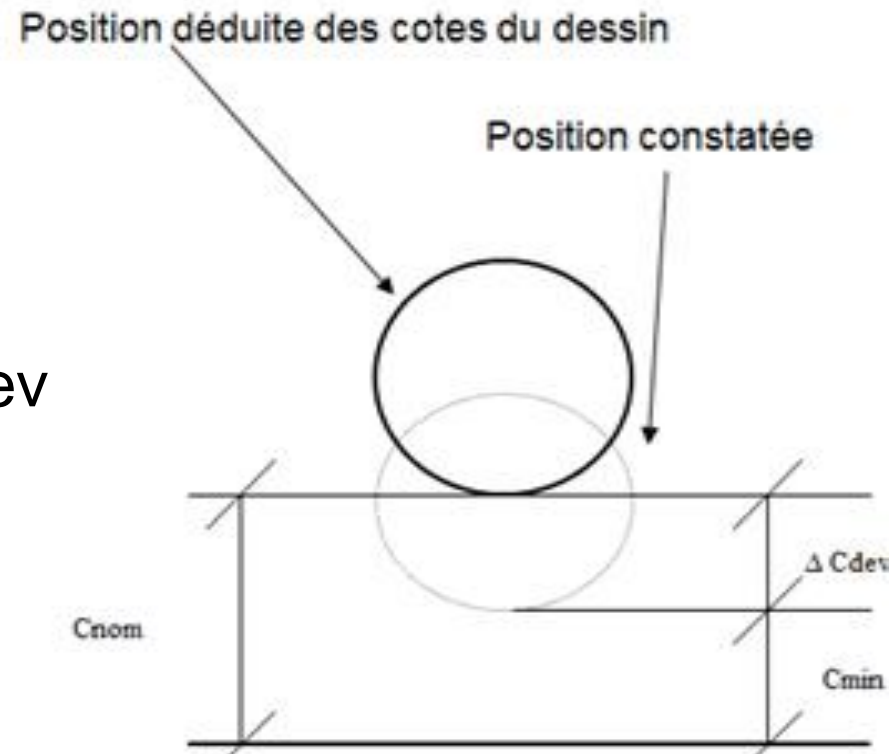
$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

La réduction possible de l'enrobage ($\Delta C_{dev} < 10$ mm) permet d'inciter à un meilleur contrôle du positionnement réel des armatures et une meilleure qualité de réalisation.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

TOLERANCE D'EXECUTION

$$C_{\text{nom}} = C_{\text{min}} + \Delta C_{\text{dev}}$$



PROCESSUS DE DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE NOMINAL SUIVANT L'EUROCODE 2

Le processus de détermination de l'enrobage des armatures dans chaque partie d'ouvrage comporte plusieurs étapes :

- **PRISE EN COMPTE DES CLASSES D'EXPOSITION**
- **CHOIX DE LA CLASSE STRUCTURALE : 50 ans = S4**
- **PRISE EN COMPTE DU TYPE D'ARMATURE et DES CONTRAINTES PARTICULIÈRES** : Parements irréguliers , Abrasion du béton
- **DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE L'ADHÉRENCE $C_{\min,b}$**
- **DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITE $C_{\min,dur}$**
- **DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL C_{\min}**
- **PRISE EN COMPTE DES TOLÉRANCES D'EXÉCUTION**

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

MODULATION DE LA CLASSE STRUCTURALE (selon EC2)

Les modulations possibles de la classe structurale, en fonction de choix particuliers pour le projet :

durée d'utilisation de projet, classe de résistance du béton, nature du ciment, compacité du béton d'enrobage

Ces modulations de la classe structurale, pour déterminer l'enrobage minimal $C_{\min, \text{dur}}$ sont définies dans le tableau 4.3 NF de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1.

Tableau 4.3NF — Modulations de la classe structurale recommandée, en vue de la détermination des enrobages minimaux $c_{\min, \text{dur}}$ dans les Tableaux 4.4N et 4.5NF

Critère	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1 ³⁾	XD2/XS2/ XA2 ³⁾	XD3/XS3/ XA3 ³⁾
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2						
	25 ans et moins : minoration de 1						
Classe de résistance ¹⁾	$\geq C30/37$ et $< C50/60$:	$\geq C30/37$ et $< C50/60$:	$\geq C30/37$ et $< C55/67$:	$\geq C35/45$ et $< C60/75$:	$\geq C40/50$ et $< C60/75$:	$\geq C40/50$ et $< C60/75$:	$\geq C45/55$ et $< C70/85$:
	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1
	$\geq C50/60$:	$\geq C50/60$:	$\geq C55/67$:	$\geq C60/75$:	$\geq C60/75$:	$\geq C60/75$:	$\geq C70/85$:
	minoration de 2	minoration de 2	minoration de 2	minoration de 2	minoration de 2	minoration de 2	minoration de 2
Nature du liant		C35/45 CEM I sans cend.vol minoration de 1	C35/45 CEM I sans cend.vol minoration de 1	C40/50 CEM I sans cend.vol minoration de 1			
Enrobage compact ²⁾	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ $C_{\min, \text{dur}}$

Les valeurs de $C_{\min, \text{dur}}$ (en mm) requis vis-à-vis de la durabilité sont données en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale dans le tableau 4.4 N pour les armatures de béton armé

Tableau 4.4N : Valeurs de l'enrobage minimal $c_{\min, \text{dur}}$ requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conformes à l'EN 10080

Exigence environnementale pour $c_{\min, \text{dur}}$ (mm)							
Classe Structurale	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

EXEMPLE DE DETERMINATION DE L'ENROBAGE

Caisson d'un pont routier en béton précontraint d'un ouvrage situé en bord de mer (distance de la mer 500m).

Le tablier est dimensionné avec un béton de classe de résistance C 35/45.

La réalisation de l'ouvrage suppose un enrobage compact des hourdis supérieur et inférieur.

	Partie d'ouvrage et face du parement	Classe d'exposition	Classe structurale	Enrobage minimal	Enrobage nominal	Enrobage nominal avec amélioration du contrôle d'exécution	Enrobage nominal avec amélioration du contrôle d'exécution et béton de classe de résistance C60/75
1	Hourdis supérieur Face supérieure	XC4 / XS1	S6	45	55	50	45
2	Hourdis supérieur Face inférieure à l'extérieur du caisson	XC4 / XS1	S5	40	50	45	40
3	Hourdis supérieur Face inférieure à l'intérieur du caisson	XC3	S5	30	40	35	30
4	Ame Face extérieure du caisson	XC4 / XS1	S6	45	55	50	45
5	Ame face intérieure du caisson	XC3	S6	35	45	40	35
6	Hourdis inférieur Face supérieure à l'intérieur du caisson	XC3	S6	35	45	40	35
7	Hourdis inférieur Face inférieure à l'extérieur du caisson	XC4 / XS1	S5	40	50	45	40

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ $c_{\min, \text{dur}}$ – Approche prescriptive

Tableau 4.3NF — Modulations de la classe structurale recommandée, en vue de la détermination des enrobages minimaux $c_{\min, \text{dur}}$ dans les Tableaux 4.4N et 4.5NF

Critère	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1 ³⁾	XD2/XS2/ XA2 ³⁾	XD3/XS3/ XA3 ³⁾
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2
	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1
Classe de résistance ¹⁾	$\geq C30/37$ et < C50/60 : minoration de 1	$\geq C30/37$ et < C50/60 : minoration de 1	$\geq C30/37$ et < C55/67 : minoration de 1	$\geq C35/45$ et < C60/75 : minoration de 1	$\geq C40/50$ et < C60/75 : minoration de 1	$\geq C40/50$ et < C60/75 : minoration de 1	$\geq C45/55$ et < C70/85 : minoration de 1
	$\geq C50/60$: minoration de 2	$\geq C50/60$: minoration de 2	$\geq C55/67$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C70/85$: minoration de 2
Nature du liant		Béton de classe $\geq C35/45$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe $\geq C35/45$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe $\geq C40/50$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1			
Enrobage compact ²⁾	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1

Tableau 4.4N : Valeurs de l'enrobage minimal $c_{\min, \text{dur}}$ requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conformes à l'EN 10080

Classe Structurale	Exigence environnementale pour $c_{\min, \text{dur}}$ (mm)						
	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Approche prescriptive – NF EN 13369 et NF EN 206+A2/CN

Possibilité de diminuer d'une classe structurale en valorisant les bonnes résistances mécaniques

Possibilité de diminuer d'une classe structurale en fonction de la nature du liant

Possibilité de valoriser la compacité du béton d'enrobage

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ $C_{min,dur}$ – Approche performantielle

Tableau 4.3NF — Modulations de la classe structurale recommandée, en vue de la détermination des enrobages minimaux $c_{min,dur}$ dans les Tableaux 4.4N et 4.5NF

Critère	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1 ³⁾	XD2/XS2/ XA2 ³⁾	XD3/XS3/ XA3 ³⁾
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2
	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1
Classe de résistance ¹⁾	$\geq C30/37$ et $< C50/60$: minoration de 1	$\geq C30/37$ et $< C50/60$: minoration de 1	$\geq C30/37$ et $< C55/67$: minoration de 1	$\geq C35/45$ et $< C60/75$: minoration de 1	$\geq C40/50$ et $< C60/75$: minoration de 1	$\geq C40/50$ et $< C60/75$: minoration de 1	$\geq C45/55$ et $< C70/85$: minoration de 1
	$\geq C50/60$: minoration de 2	$\geq C50/60$: minoration de 2	$\geq C55/67$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C70/85$: minoration de 2
Nature du liant		Béton de classe $\geq C35/45$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe $\geq C35/45$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe $\geq C40/50$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1			
Enrobage compact ²⁾	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1

Tableau 4.4N : Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conformes à l'EN 10080

Classe Structurale	Exigence environnementale pour $c_{min,dur}$ (mm)						
	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

FD P 18-480 – Justification de la durabilité des bétons par approche performantielle

Renvoi explicite à ce FD dans la norme NF EN 206/CN pour les bétons qui dérogent aux règles prescriptives sur les granulats et à celles de l'annexe F de la norme NF EN 206/CN.

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'oeuvre

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ $C_{min,dur}$ – Approche performantielle

Tableau 4.3NF — Modulations de la classe structurale recommandée, en vue de la détermination des enrobages minimaux $c_{min,dur}$ dans les Tableaux 4.4N et 4.5NF

Critère	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1 ³⁾	XD2/XS2/ XA2 ³⁾	XD3/XS3/ XA3 ³⁾
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2
	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1
Classe de résistance ¹⁾	$\geq C30/37$ et $< C50/60$: minoration de 1	$\geq C30/37$ et $< C50/60$: minoration de 1	$\geq C30/37$ et $< C55/67$: minoration de 1	$\geq C35/45$ et $< C60/75$: minoration de 1	$\geq C40/50$ et $< C60/75$: minoration de 1	$\geq C40/50$ et $< C60/75$: minoration de 1	$\geq C45/55$ et $< C70/85$: minoration de 1
	$\geq C50/60$: minoration de 2	$\geq C50/60$: minoration de 2	$\geq C55/67$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C60/75$: minoration de 2	$\geq C70/85$: minoration de 2
Nature du liant		Béton de classe $\geq C35/45$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe $\geq C35/45$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1	Béton de classe $\geq C40/50$ à base de CEM I sans cendres volantes : minoration de 1			
Enrobage compact ²⁾	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1	minoration de 1

Tableau 4.4N : Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conformes à l'EN 10080

Classe Structurale	Exigence environnementale pour $c_{min,dur}$ (mm)						
	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

FD P 18-480 : respect des seuils de base (Vitesse de carbonatation ou porosité)

FD P 18-480 : respect des seuils renforcés (Vitesse de carbonatation ou porosité) – diminution d'une classe structurale (5 mm)

FD P 18-480 : respect des seuils encore renforcés (Vitesse de carbonatation ou porosité) – diminution de deux classes structurales (10 mm)

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE MINIMAL VIS-À-VIS DE LA DURABILITÉ $C_{\min, \text{dur}}$ – Approche performantielle

Classe d'exposition	Modulation selon la classe de résistivité à 90 j selon XP P 18-481 (Ω.m)	Vitesse caractéristique de carbonatation accélérée selon XP P 18-458 (DUP 100 ans)		
		sans minoration	minoration 1 classe	minoration 2 classes
XC1	< 100	4	3	1,8
	100 à 175			
	> 175			
XC2	< 100	2,6	2,2	1,8
	100 à 175	3	2,6	
	> 175			
XC3	< 100	1,8	1,4	1
	100 à 175			
	> 175			
XC4	< 100	1,8	1,4	1
	100 à 175			
	> 175	2,2	1,8	1,4

Recommandations à l'usage des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre

Merci de votre attention