

NOTE D'INFORMATION : BIEN PRESCRIRE LES BÉTONS

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE DES ARMATURES

La détermination de l'enrobage doit prendre en compte plusieurs facteurs :

- les classes d'exposition associées à la partie d'ouvrage concernée,
- la durée d'utilisation du projet,
- la classe de résistance du béton de la partie d'ouvrage,
- le type de système de contrôle qualité mis en œuvre,
- la régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé,
- le type d'armatures (passives ou actives) et leur nature (acier au carbone, acier inoxydable),
- la maîtrise du positionnement des armatures.

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 (par exemple, pour un voile, la (ou les) classe(s) d'exposition pour déterminer l'enrobage de la face intérieure, et la (ou les) classe(s) 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 NF EN 1992-1-1, et les éventuelles optimisations prévues (classe de résistance à la compression supérieure à la classe de référence, grandeur associée à la durabilité améliorée, contrôle de la qualité, nature des armatures...).

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 ;
- la bonne transmission des efforts d'adhérence béton armatures ;
- une résistance au feu convenable du béton.

NOTA : Cette note d'information ne concerne pas la détermination des enrobages des éventuelles armatures qui peuvent être mises en œuvre au sein d'un BFUP.

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.

En effet la détermination de la valeur de l'enrobage doit prendre en compte de façon extrêmement 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 la qualification du béton par méthode performantielle ;
- 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 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 une grandeur associée à la durabilité améliorée (par exemple vitesse de carbonatation accélérée ou coefficient de migration des ions chlorure) ;
- 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.

INCIDENCE DE LA QUALITÉ DE L'ENROBAGE

L'enrobage des armatures et les caractéristiques du béton d'enrobage sont les paramètres fondamentaux permettant de maîtriser la pérennité des ouvrages exposés aux phénomènes de corrosion des armatures et donc d'allonger leur durée d'utilisation.

L'optimisation des performances du béton et de l'enrobage des armatures constitue donc un facteur de progrès essentiel pour assurer la durabilité des ouvrages.

En effet, l'enrobage et la compacité du béton de la zone d'enrobage ont un impact immédiat sur la période de propagation qui précède l'initiation et le développement de la corrosion des armatures. A titre d'exemple, il est couramment reconnu que l'augmentation de l'enrobage minimal d'une valeur de 10 mm permet d'augmenter la durée de service de l'ouvrage pour passer de 50 ans à 100 ans.

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact sont naturellement protégées des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création, à la surface du métal, d'une pellicule protectrice de ferrite $Fe_2 O_3$ CaO (dite de passivation). Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium sur l'oxyde de fer.

La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures (l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique de pH élevé de l'ordre de 13). Tant que les armatures se trouvent dans un milieu alcalin présentant un pH compris entre 9 et 13,5, elles sont protégées.

Il est donc possible de protéger les armatures par une épaisseur suffisante d'un béton compact, ayant fait l'objet d'une cure appropriée.

DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE

L'enrobage minimal, au sens de la norme NF EN 1992-1-1, est défini dans la section 4 « Durabilité et enrobage des armatures ». Il doit satisfaire en particulier aux exigences de transmissions des forces d'adhérences et assurer une protection des aciers contre la corrosion. Cet enrobage minimal est donné par l'expression :

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

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.

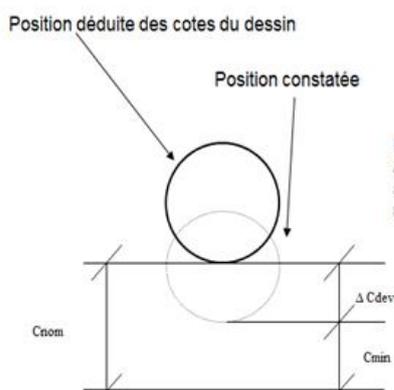
La détermination de l'enrobage des armatures pour chaque partie d'ouvrage tient compte de (ou des) la classe(s) d'exposition, de la classe structurale et de ses modulations possibles en fonction de choix particuliers, du type d'armatures, de contraintes particulières (parements irréguliers, risque d'abrasion...) et des tolérances d'exécution.

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 $\Delta C_{dev} = 10$ 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.



La norme NF EN 1992-1-1 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.

Dans tous les cas, l'augmentation de l'enrobage nominal peut conduire à prévoir des dispositions de ferrailage spécifiques complémentaires (armatures de peau).

Nota : L'augmentation de l'enrobage est favorable pour la stabilité au feu. Pour assurer celle-ci, on peut être amené à prévoir des dispositions de ferrailage spécifiques telles que :

- des enrobages supérieurs à ceux imposés par la protection contre la corrosion ;
- un fractionnement en plusieurs armatures de faibles diamètres. Certaines d'entre elles seront plus éloignées des parois exposées au feu, en particulier près des angles saillants où la température est plus élevée. L'espacement de ces armatures sera parfois plus important que celui habituellement exigé pour permettre un bétonnage correct.

Nota : De nombreuses précisions complémentaires pour la détermination de l'enrobage sont données dans le Guide Technique LCPC « Note Technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France ».

PRISE EN COMPTE DES CLASSES D'EXPOSITION

La détermination des valeurs d'enrobage des armatures nécessite de prendre en compte pour chaque partie d'ouvrage, les classes d'exposition traduisant les risques de corrosion des armatures.

La recommandation « choix des classes d'exposition selon la norme NF EN 206/CN » décrit les classes d'exposition relatives à la corrosion des armatures (cf paragraphe « classes concernant l'attaque des armatures »).

Un béton d'une partie d'ouvrage peut être soumis à différentes agressions selon la face de la partie d'ouvrage.

La détermination de l'enrobage doit donc être effectuée séparément pour chaque face en prenant en compte les classes d'exposition de chaque face.

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 qui vont permettre de prendre successivement en compte :

- La classe d'exposition,
- La classe structurale et les modulations possibles en fonction de choix particuliers,
- Le type d'armatures,
- Des contraintes particulières,
- Les tolérances d'exécution.

Prise en compte des classes d'exposition

Un béton peut être soumis à plusieurs classes d'exposition concomitantes qui traduisent avec précision l'ensemble des actions environnementales. Les classes d'exposition sont définies dans le tableau 4.1 de l'article 4.2 de l'Eurocode 2 (norme NF EN 1992-1-1) en conformité avec la norme NF EN 206/CN.

Choix de la classe structurale

L'Annexe Nationale de l'EUROCODE 0 (NF EN 1990 – Base de calcul des structures) définit 6 classes structurales (S1 à S6).

A chaque classe est associée une durée (durée d'utilisation de projet) : durée pendant laquelle une structure est censée pouvoir être utilisée en faisant l'objet de la maintenance escomptée mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures.

Les bâtiments correspondent à la classe structurale S4. Ils sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 50 ans.

Les ouvrages de Génie Civil sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans. Il faut donc majorer la classe structurale de 2 points, d'où la prise en compte de la classe structurale S6.

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), engageant le maître d'œuvre, sont données dans le tableau 4.3 N (F). à l'article 4.4.1.2 (5) de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1.

Ces modulations de la classe structurale, pour déterminer l'enrobage minimal $C_{min,dur}$ 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 $c_{min,dur}$ 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⁾	≥ C30/37 et < C50/60 :	≥ C30/37 et < C50/60 :	≥ C30/37 et < C55/67 :	≥ C35/45 et < C60/75 :	≥ C40/50 et < C60/75 :	≥ C40/50 et < C60/75 :	≥ 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
	≥ C50/60 :	≥ C50/60 :	≥ C55/67 :	≥ C60/75 :	≥ C60/75 :	≥ C60/75 :	≥ 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

Dans le cas de béton justifié par méthode performantielle selon FD P18-480, les critères ci-dessus portant sur la classe de résistance et la nature du liant sont remplacés par ceux portant sur les grandeurs associées à la durabilité figurant en annexe A du FD P18-480.

L'obtention d'une bonne compacité de la zone d'enrobage concerne par exemple :

- la face coffrée des éléments plans (assimilables à des dalles, éventuellement nervurées), coulés horizontalement sur des coffrages industriels,
- les éléments préfabriqués industriellement : éléments extrudés, ou faces coffrées des éléments coulés dans des coffrages métalliques,
- la sous face des dalles de pont, éventuellement nervurées, sous réserve de l'accessibilité du fond de coffrage aux dispositifs de vibration.

Nota : si un béton d'une partie d'ouvrage est concerné par plusieurs classes d'exposition, on considère l'exigence la plus sévère et donc l'enrobage le plus important.

Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité $C_{min,dur}$

Les valeurs de $C_{min,dur}$ (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 et dans le tableau 4.5 NF pour les armatures de précontrainte à l'article 4.4.1.2 (5) de la norme NF EN 1992-1-1

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

Exigence environnementale pour $c_{min,dur}$ (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

Pour les classes d'expositions XF1, XF2, XF3 et XF4. La valeur de $C_{min,dur}$ est déterminée en prenant en compte les classes d'expositions concomitantes XC1 à XC4 et XD1 à XD3.

L'annexe française de la norme NF EN 1992-1-1 précise comment tenir compte de cette concomitance de classe.

Type de salage	Classe d'exposition XF			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Peu fréquent	XC4	SO	XD1 ou XC4 ^(*)	SO
Fréquent	SO	XD1 XD3 ^(**)	SO	XD2 XD3 ^(**)
Très fréquent	SO	SO	SO	XD3

SO : sans objet

(*) XD1 : si le béton est formulé avec un entraîneur d'air.

XC4 : si le béton est formulé sans entraîneur d'air

(**) XD3 : pour les éléments très exposés (pour les ponts : corniches, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, solins des joints de dilatation).

Prise en compte du type d'armature

L'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1 dans l'article 4.4.1.2 (7) précise les cas pour lesquels l'enrobage $C_{min,dur}$ peut être réduit, d'une valeur $\Delta C_{dur,st}$ ou $\Delta C_{dur,add}$. Ce choix engage le maître d'œuvre. La valeur est fixée par les documents particuliers du marché.

- Utilisation d'armatures en acier résistant à la corrosion : Armature INOX

"Sur justification spéciale et à condition d'utiliser des aciers dont la résistance à la corrosion est éprouvée (certains aciers inox par exemple), pour la durée d'utilisation et dans les conditions d'exposition du projet, les documents particuliers du marché pourront fixer la valeur de $\Delta C_{dur,st}$. En outre, le choix des matériaux, des paramètres de mise en œuvre et de maintenance doivent faire l'objet d'une étude particulière. De même, l'utilisation de tels aciers ne peut s'effectuer que si les caractéristiques propres de ces aciers (notamment soudabilité, adhérence, dilatation thermique, compatibilité des aciers de nature différente) sont vérifiées et prises en compte de façon appropriée"

extrait de l'article 4.4.1.2 (7).

- Mise en place d'une protection complémentaire :

En cas de mise en place d'une protection complémentaire, l'enrobage minimal n'est pas diminué, sauf pour les revêtements adhérents justifiés vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs pendant la durée d'utilisation de projet.

Prise en compte de contraintes particulières

L'Eurocode 2 et l'Annexe Nationale Française prescrivent d'augmenter l'enrobage minimal dans les cas suivants :

- Parements irréguliers : Dans le cas de parements irréguliers (béton à granulat apparent par exemple), l'enrobage minimal doit être augmenté d'au moins 5 mm.
- Abrasion du béton : Dans le cas de béton soumis à une abrasion, il convient d'augmenter l'enrobage de 5 mm, 10 mm, et 15 mm respectivement pour les classes d'abrasion XM1, XM2, et XM3.

Classe d'abrasion	Conditions	Valeurs des coefficients
XM1	Abrasion modérée : <ul style="list-style-type: none"> • Frottements d'amarres ou de chaînes ; • Sédiments charriés par la houle. 	$k_1 = 5\text{mm}$
XM2	Abrasion importante : <ul style="list-style-type: none"> • Coques de navires pouvant glisser sur un front d'accostage. 	$k_2 = 10\text{mm}$
XM3	Abrasion extrême : <ul style="list-style-type: none"> • Godets de chargeurs de produits en vrac. 	$k_3 = 15\text{mm}$

CLASSES D'ABRASION

- Béton coulé au contact de surfaces irrégulières :

Dans le cas d'un béton coulé au contact de surfaces irrégulières, il convient généralement de majorer l'enrobage minimal en prenant une marge plus importante pour le calcul. Il convient de choisir une majoration en rapport avec la différence causée par l'irrégularité. L'enrobage minimal doit être au moins égal à k_1 mm pour un béton coulé au contact d'un sol ayant reçu une préparation (y compris béton de propreté) et k_2 mm pour un béton coulé au contact direct du sol.

Les valeurs recommandées par l'Annexe Française sont :

$$k_1 = 30 \text{ mm et } k_2 = 65 \text{ mm.}$$

Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence $C_{\min,b}$

L'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence $C_{\min,b}$ est précisé dans le tableau 4.2 article 4.4.1.2 (3) de la norme EN 1992-1-1.

Il convient que $C_{\min,b}$ ne soit pas inférieur :

- au diamètre de la barre dans le cas d'armature individuelle ;
- au diamètre équivalent dans le cas de paquet d'armatures.

$C_{\min,b}$ est majoré de 5 mm si le diamètre du plus gros granulat du béton est supérieur à 32 mm.

Détermination de l'enrobage minimal C_{min}

L'enrobage minimal est déterminé par la formule donnée au paragraphe (enrobage minimal selon l'Eurocode 2) en intégrant les valeurs de $C_{min,b}$, $C_{min,dur}$, $\Delta C_{dur,y}$, $\Delta C_{dur,st}$ et $\Delta C_{dur,add}$

Prise en compte des tolérances d'exécution

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

La valeur recommandée dans l'article 4.4.1.3 (3) est $\Delta C_{dev} = 10$ mm sauf justification particulière. En particulier cette valeur peut être réduite sous réserve de conditions strictes de contrôle qualité à la fois sur la conception et l'exécution des ouvrages.

L'enrobage nominal est donné par la formule :

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

Si la réalisation ou la conception et l'exécution des éléments d'ouvrage sont soumis à un système d'Assurance Qualité (incluant en particulier des dispositions spécifiques relatives à la conception, au façonnage ou à la mise en place des armatures), il est possible de réduire la valeur de ΔC_{dev} à une valeur comprise entre 5 et 10 mm.

Cette réduction possible de ΔC_{dev} permet d'inciter à un meilleur contrôle du positionnement réel des armatures et une meilleure qualité de réalisation.

EXEMPLE DE DÉTERMINATION DE L'ENROBAGE

On considère le 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.

Nota : diamètres des armatures (Ames 25 mm Hourdis 20 mm).

	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

Modulation de la classe structurale :

La durée d'utilisation de l'ouvrage est de 100 ans, donc la classe structurale à prendre en compte est S6.

Le béton est de classe de résistance C35/45 donc pas de possibilité de minorer la classe structurale (avec la classe d'exposition XS1 la classe structurale ne peut être minorée que si le béton a une classe de résistance supérieure à la classe de résistance C40/50).

S'il est mis en œuvre un contrôle d'exécution des armatures la valeur de ΔC_{dev} peut être minorée de 5 mm.

Si on choisit de mettre en œuvre un béton de classe de résistance C60/75 la classe structurale peut être minorée de 1.