Détermination et optimisation de l'enrobage des armatures

Novembre 2016

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

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 ;
- une résistance au feu convenable.

Ainsi il est possible de placer les armatures hors d'atteinte des agents agressifs en les protégeant par une épaisseur suffisante d'un béton compact, ayant fait l'objet d'une cure appropriée.

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

Incidence de la qualité de l'enrobage

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré 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_2O_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.

NOTA : l'enrobage et la compacité 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 et de passer de 50 ans à 100 ans.

NOTA : Des précisions complémentaires pour la détermination de l'enrobage pour les structures en béton conçues avec l'Eurocode 2 sont données dans le Guide Technique LCPC « Note Technique sur les dispositions relatives à l'enrobage pour l'application en France ».

C'est l'enrobage nominal qui est précisé sur les plans d'exécution de l'ouvrage. Il constitue la référence pour la fabrication et pour la pose des armatures.

L'enrobage nominal est égal à la somme de l'enrobage minimal et d'une "marge de sécurité" pour tolérances d'exécution.

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 ;
- le type de système de contrôle qualité mise 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) ;
- 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 de service supérieure en augmentant la valeur de l'enrobage.

Enrobage minimal selon l'Eurocode 2

L'enrobage minimal est défini dans la norme NF EN 1992-1-1, section 4 « Durabilité et enrobage des armatures » (article 4.4.1). Il doit satisfaire en particulier aux exigences de transmissions des forces d'adhérences et assurer une protection des aciers contre la corrosion.

Il est donné par la formule :

$$C_{min} = \max [C_{min,b} \; ; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{durst} - C_{dur,add} \; ; 10 \text{ mm}]$$

- Avec $C_{min,b}$: enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence (béton/armature). La valeur de $C_{min,b}$ est rarement dimensionnante pour la détermination de C_{min}.
- $C_{min,dur}$: enrobage minimal vis-à-vis des conditions environnementales. $C_{min,dur}$ tient compte de la classe d'exposition et de la classe structurale (qui dépend de la durée d'utilisation du projet)
- Et :

$\Delta C_{dur,y}$: 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.

À lire aussi

Prévention des phénomènes de corrosion des armatures en acier dans le béton

Dans des conditions normales, les armatures enrobées d'un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement des risques de corrosion par un phénomène de passivation qui résulte de la création...

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 les 8 étapes suivantes 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.

- **Étape 1** : 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 de chaque partie d'ouvrage sont une donnée de base du projet. Elles sont imposées par les conditions d'environnement du projet. Elles 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

- **Étape 2** : **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 et les ouvrages de génie civil courants correspondent à la classe structurale S4. Ils sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 50 ans. Les ponts, à la classe structurale S6. Ils sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans.

  Ces durées supposent la mise en œuvre de bétons conformes aux tableaux N.A.F de la norme NF EN 206/CN

  Les documents particuliers du marché peuvent spécifier des durées d'utilisation de projet différentes.

  Les modifications 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 synthétisées dans le tableau N°1 ci-dessous (Extraits du tableau 4.3 N (F)).

  L'amélioration de la qualité du béton se traduit en particulier par une minoration de la classe structurale de 1 ou de 2.

Tableau n°1 : modulation de la classe structurale recommandée

Critère	CLASSE D'EXPOSITION						
	XO	XC1	XC2, XC3	XC4	XD1 / XS1 / XA1	XD2 / XS2 / XA2	XD3 / XS3 / XA3
Durée d'utilisation de projet	100 ans, majoration de 2						
	25 ans et moins minoration de 1						
Classe de résistance du béton	≥ C 30/37	≥ C 30/37	≥ C 30/37	≥ C 35/45	≥ C 40/50	≥ C 40/50	≥ C 45/55
	Minoration de 1						
	≥ C 50/60	≥ C 50/60	≥ C 55/67	≥ C 60/75	≥ C 60/75	≥ C 60/75	≥ C 70/85
	Minoration de 2						

Nature du liant	-	≥ C 35/45	≥ C 35/45	≥ C 40/50	-	-	-
	-	Béton à base de CEM I Sans cendres volantes			-	-	-
		Minoration de 1					
Enrobage compact	Minoration de 1						

(*) 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.

- **Étape 3** : **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 4.5NF pour les armatures de précontrainte à l'article 4.4.1.2 (5) de la norme NF EN 1992-1-1

TABLEAU N° 4.4N : Valeur de $C_{min,dur}$ en fonction de la classe d'exposition et de la classe structurale dans le cas des armatures de béton armé

Classe structurale	Classe d'exposition						
	XO	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 Cmin,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).

Pour les classes d'exposition XA1 à XA3, la valeur de $C_{min,dur}$ est aussi déterminée en prenant en compte les classes

d'exposition concomitantes XC ou XD.

- **Étape 4** : **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'oeuvre. 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.

- **Étape 5** : **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.

Classes d'abrasion

Classe d'abrasion	Conditions	Valeurs des coefficients
XM1	Abrasion modérée : • frottements d'amarres ou de chaînes ; • sédiments charriés par la houle.	$k_1 = 5mm$
XM2	Abrasion importante : • coques de navires pouvant glisser sur un front d'accostage.	$k_2 = 10mm$
XM3	Abrasion extrême : • godets de chargeurs de produits en vrac.	$k_3 = 15mm$

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 :

$k_1 = 30$ mm et $k_2 = 65$ mm.

- **Étape 6** : **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.

- **Étape 7** : **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 $\Delta C_{dur,add}$

- **Étape 8** : **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 ΔC_{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.

NOTA :

- L'Eurocode 2 attire l'attention sur les deux points suivants :
- Les problèmes de fissuration auxquels risque de conduire, un enrobage nominal supérieur à 50 mm.
- Les difficultés de bétonnage auxquelles risque de conduire, un enrobage nominal inférieur à la dimension nominale de plus gros granulats.

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 **ferraillage** 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.

Exemple d'optimisation de la valeur d'enrobage

L'exemple concerne une partie d'ouvrage située en zone de marnage.

- **Etape 1 : Prise en compte de la classe d'exposition**

Les classes d'exposition à prendre en compte sont :

- XS3 : zone de marnage
- XC4 : alternance d'humidité et de séchage

- **Etape 2 : choix de la classe structurale**

  Les ouvrages situés en site maritime sont dimensionnés pour une durée d'utilisation de projet de 100 ans. Ils correspondent donc à la classe structurale S6.

- **Etape 3 : Prise en compte de la durabilité**

  La valeur de $C_{min,dur}$ est déterminée en fonction de la combinaison des classes d'exposition et de la classe structurale.

- Classe d'exposition XS3 et classe structurale S6 : $C_{min,dur}$ = 55mm
- Classe d'exposition XC4 et classe structurale S6 : $C_{min,dur}$ = 40mm
- **Etape 4 : Prise en compte du type d'armature**

  L'utilisation d'armatures inox permet de réduire la valeur de l'enrobage. On peut prendre en compte a priori une valeur de $\Delta C_{dur,st}$ égale à 15mm.

- **Etape 5 : Prise en compte de contraintes particulières**
- Parements irréguliers : sans objet
- Classe d'abrasion

  L'ouvrage est soumis aux sédiments charriés par la houle, donc à une classe d'abrasion XM1 qui correspond à un coefficient k_1=5mm

-
- Béton coulé au contact de surfaces irrégulières : sans objet

- **Etape 6 : Prise en compte des contraintes d'adhérence**

  On suppose que le diamètre maximal des armatures est de 40mm et que le diamètre du plus gros granulat du béton est inférieur à 32 mm.

- **Etape 7 : détermination de l'enrobage minimal**

  ○ Armature acier au carbone ○ Armature inox

  C_{min} = 55+5 = 60mm C_{min} = 55 - 15 + 5 = 45mm

- **Etape 8 Prise en compte des tolérances d'exécution**

  ΔC_{dev} sera pris égal à 10mm

  d'où

  ○ Armature au carbone ○ Armature inox

  C_{nom} = 70mm C_{nom} = 55mm

- **Prise en compte d'une classe de résistance du béton supérieure**

  Dans le cas d'une classe d'exposition XS3 si l'on choisit une classe de résistance du béton au moins égale à C45/55, il est possible de minorer la classe structurale de 1 point, et de 2 points dans le cas d'une classe de résistance au moins égale à C70/85, soit une réduction de la valeur de $C_{min/dur}$ respectivement de 5 et 10mm.

- **Conclusion**

  Il en résulte les divers choix suivants pour l'optimisation de l'enrobage en fonction du type d'armatures et de la classe de résistance du béton.

Type d'armature	Classe de résistance du béton		
	C35/45	C45/55	C70/85
Acier au carbone	70	65	60
Inox	55	50	45

À lire aussi

Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures

Le béton est généralement associé à des armatures (en acier au carbone), ce qui permet d'augmenter sa résistance en traction et en flexion, d'où le terme de béton armé.

Auteur

Patrick Guiraud



Retrouvez toutes nos publications sur les ciments et bétons sur infociments.fr

Consultez les derniers projets publiés
Accédez à toutes nos archives
Abonnez-vous et gérez vos préférences
Soumettez votre projet

Article imprimé le 26/11/2026 © infociments.fr