



Hall d'essai, I.U.T. Département génie civil, 19300 EGLETONS

Les modalités d'évaluation sont les suivantes :

- 1 note de Travaux Pratiques + 1 note de contrôle sur table. La moyenne du module sera calculée avec ces notes. Les coefficients respectifs sont  $\frac{1}{4} + \frac{3}{4}$
- Tous les documents de cours, de TD et de TP seront autorisés en contrôle des connaissances.
- Le contrôle de connaissances du module SST5 aura lieu en juin. Il est donc de la responsabilité de chaque étudiant de se préparer au mieux. Toutes les séances de TD sont déjà planifiées et vous aideront à organiser votre travail personnel.
- Le partiel, d'une durée de deux heures, permettra à chacun de valoriser son travail personnel sur les différentes thématiques abordées en cours. Les enseignants évalueront les copies, la correction aux questions du partiel sera faite individuellement sur la base de questions individuelles seulement.
- Un document format A3 présentant un plan de ferrailage de poutre en béton armé est fourni avec ce document. Il sert de support " fil rouge " de ce module. L'objectif est d'être capable de refaire le même document sur une étude de cas similaire en TD ou en partiel, en fin de semestre 2

#### **Bibliographie :**

- NF EN 1992-1-1 : <https://sagaweb.afnor.org/>
- AFCAB : Association Française de certification des armatures du béton, [www.afcab.org](http://www.afcab.org)
- CIM BETON Centre d'information sur le ciment et ses applications, [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)
- Agence qualité construction : <http://www.qualiteconstruction.com/>
- Adhel : <http://moodle.egletons.unilim.fr/> rubrique Module / S2 / M2302 Bases du béton armé

## INDEX DES ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : schéma de ferrailage de la poutre brevetée par Joseph MONIER en 1878.....	8
Illustration 2 : exemple de réalisation en béton armé bâclée en travaux neufs, avant livraison au maître d'ouvrage....	9
Illustration 3 : mise en place d'une retombée de poutre préfabriquée de masse 3,5 tonnes.....	17
Illustration 4 : exemple d'aciers à verrous et d'aciers à empreinte.....	17
Illustration 5 : définition de l'enrobage [4.4.1].....	21
Illustration 6 : phénomène d'adhérence autour d'une armature noyée dans le béton.....	25
Illustration 7 : dispositif d'essai de la poutre en travaux pratiques.....	28
Illustration 8 : développement des fissures dans la zone tendue d'une poutre fléchie.....	30
Illustration 9 : déformation importante des matériaux en zone tendue d'une poutre fléchie .....	31
Illustration 10 : flambement des aciers de montage en zone comprimée d'une poutre fléchie.....	32
Illustration 11 : rupture en traction des aciers tendus en partie inférieure d'une poutre fléchie.....	32
Illustration 12 : désignations géométriques des différentes zones d'une section droite en T <sub>e</sub> sous une sollicitation de moment de flexion positive. Zone hachurée comprimée.....	34
Illustration 13 : section réelle et section de calcul à l'état limite ultime en zone de moment positif.....	38
Illustration 14 : diagrammes de déformations limites d'une section droite en zone de moment positif.....	38
Illustration 15 : espacements des armatures dans le béton.....	46
Illustration 16 : désignation géométrique des différentes zones d'une section droite en T <sub>e</sub> sous moment positif.....	50
Illustration 17 : représentation des zones comprimées et tendues d'une poutre fléchie.....	51
Illustration 18 : ruine à l'effort tranchant d'une poutre fléchie non armée transversalement.....	57
Illustration 19 : modèle de treillis de RITTER pour $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$ .....	59
Illustration 20 : valeur de calcul de l'effort tranchant agissant dans le cas d'un chargement réparti uniformément....	65
Illustration 21 : épure de répartition des armatures transversales.....	67
Illustration 22 : décalage de la sollicitation agissante de flexion.....	68
Illustration 23 : ferrailage complet d'une poutre fléchie, épure d'arrêt des barres, épure de répartition.....	73

## INDEX DES TABLES

Tableau III.1 : Caractéristiques de résistance et de déformation du béton [Tab. 3.1].....	12
Tableau III.2 : Classe de ductilité des aciers à béton (EC2 : Annexe C).....	18
Tableau IV.1 : Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement (EN 206-1) [Tab 4.1].....	20
Tableau IV.2 : Classes indicatives de résistance [Tab E.1N].....	21
Tableau IV.3 : Enrobage minimal $c_{min,b}$ requis vis à vis de l'adhérence [Tab 4.2].....	22
Tableau IV.4 : Classification structurale recommandée [Tab 4.3N].....	23
Tableau IV.5 : Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min,dur}$ requis vis-à-vis la durabilité [Tab 4.4N].....	23
Tableau V.1 : Diamètre minimal du mandrin afin d'éviter les dommages aux armatures [Tab 8.1N].....	26
Tableau VI.1 : Valeurs de $\mu$ qui définissent la zone A1, A2, B1 ou B2 de la figure page 38.....	42
Tableau X.1 : longueur d'ancrage de référence $l_{b,rqd}$ [8.4.3] .....	77
Tableau X.2 : Valeurs des coefficients $\alpha_1$ , $\alpha_2$ , $\alpha_3$ , $\alpha_4$ et $\alpha_5$ [Tab. 8.2].....	79
Tableau X.3 : Valeur du coefficient $\alpha_6$ .....	81
Tableau X.4 : longueurs de recouvrement requises pour les fils de répartition des treillis [Tab 8.4].....	84
Tableau X.5 : Aires des sections d'aciers pour armatures Hautes Adhérence par diamètre (mm, cm <sup>2</sup> ).....	85

# TABLE DES MATIÈRES

I. Liste des notations Eurocode 2.....	5
II. Le béton armé, un matériau et une technique de construction.....	8
1. Le béton armé, historique.....	8
a. Le béton des inventeurs.....	8
b. Le béton des ingénieurs.....	8
2. Le béton des constructeurs.....	9
3. Pourquoi l'acier dans le béton ?.....	9
4. Contexte réglementaire des calculs.....	10
a. Règlements antérieurs aux Eurocodes.....	10
b. Les Eurocodes.....	10
III. Les matériaux du béton armé.....	11
1. Le béton.....	11
a. Comportement expérimental du matériau béton.....	11
b. Valeur de la résistance caractéristique à la compression d'un béton [3.1.2].....	11
c. Valeur de la résistance caractéristique à la traction d'un béton [3.1.2].....	13
d. Déformations élastiques du béton [3.1.3].....	13
e. Relation contrainte déformation pour une analyse structurale non linéaire [3.1.5].....	14
f. Résistance de calcul en compression et résistance de calcul en traction [3.1.6].....	14
g. Relation contrainte déformation pour le calcul des sections [3.1.7].....	15
h. Résistance à la traction en flexion [3.1.8].....	16
2. L'acier.....	16
a. Terminologie.....	16
b. Problématique des calculs d'aire d'armature dans le cadre d'un cours de béton armé.....	16
c. Forme de la surface latérale des armatures en acier.....	17
d. Propriétés des armatures de béton armé [3.2.2].....	18
e. Hypothèses de calcul [3.2.7].....	18
IV. Durabilité et enrobage des armatures.....	19
1. généralités [4.1].....	19
2. Conditions d'environnement [4.2].....	19
3. Exigences de durabilité [4.3].....	21
4. Méthodes de vérification [4.4].....	21
a. Calcul de l'enrobage [4.4.1].....	21
b. Enrobage minimal, $c_{min}$ [4.4.1.2].....	22
c. Enrobage minimal $C_{min,b}$ requis vis à vis de l'adhérence.....	22
d. Enrobage minimal $C_{min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité.....	22
e. Prise en compte des tolérances d'exécution $\Delta c_{dev}$ [4.4.1.3].....	24
V. association acier-béton.....	25
1. Adhérence acier - béton.....	25
2. Contexte réglementaire dans l' Eurocode 2.....	26
a. Ancrage des armatures longitudinales [8.3] et [8.4].....	26
b. Différents modes d'ancrage des armatures.....	27
VI. Etat limite ultime.....	28
1. Comportement expérimental d'une poutre en flexion simple.....	28
a. Matériels d'essai pour la flexion pure.....	28
b. Comportement des matériaux.....	29
2. Charge de ruine réelle et charge de calcul, coefficient de sécurité global.....	33
3. Poutre en béton armé, analyse structurale.....	33
a. Modèles structuraux pour l'analyse globale [5.3.1].....	33
b. Données géométriques [5.3.2].....	33
c. Portée utile des poutres et dalles dans les bâtiments [5.3.2.2].....	35
4. Notations utilisées, représentations graphiques, hypothèses de calcul à l'E.L.U. , réalité & modèles.....	36
a. Objectifs des calculs.....	37
b. Etat Limite Ultime, Hypothèses de calcul [6.1].....	37
c. Économie.....	40
5. Calcul de l'aire d'une section d'acier en flexion simple à l' E.L.U.....	40
a. Principe du calcul d'une section d'acier.....	40
b. Moment réduit limite $\mu$ .....	42
c. Démarche calculatoire de projet, organigramme général de la démarche de calcul.....	43
d. Organigramme général de la procédure de calcul des poutres à section rectangulaire.....	44
6. Calcul de la sollicitation résistante d'une section droite en flexion simple : $M_{Rd}$ .....	45
a. Calcul de la sollicitation résistante d'une section droite de poutre en béton armé.....	45
7. Dispositions constructives (Eurocode 2, section 8).....	45
a. Espacement des armatures de béton armé [8.2].....	45

b.	Paquets de barres, diamètre équivalent [8.9].....	46
c.	Ancrage des paquets de barres [8.9.2].....	47
d.	Sections minimale : généralités [9.1].....	47
e.	Sections minimale et maximale d'armatures [9.2.1.1].....	47
f.	Sections minimales d'armatures [7.3.2].....	48
g.	Armatures en zone tendues sur appuis [9.2.1.2].....	48
h.	Ancrage des armatures inférieures au niveau des appuis d'extrémité [9.2.1.4].....	48
i.	Armatures de peau [9.2.4].....	49
VII.	Flexion simple à l'état limite ultime poutre en Té.....	50
1.	Rappels, Données géométriques.....	50
2.	Méthode de calcul des poutres en Té en zone de moment positif.....	52
a.	Dispositions constructives [9.2.1.1].....	54
b.	Cisaillement entre l'âme et les membrures des sections en T.....	54
c.	Organigramme général de la procédure de calcul des poutres en Té.....	55
VIII.	Poutre en béton armé soumise à un effort tranchant.....	56
1.	Introduction.....	56
a.	Comportement expérimental d'une poutre sous sollicitation de flexion et d'effort tranchant.....	57
b.	Modélisation en treillis de RITTER.....	58
2.	Contexte réglementaire.....	62
a.	Procédure générale de vérification [6.2.1].....	62
b.	Éléments pour lesquels aucune armature d'effort tranchant n'est requise [6.2.2].....	62
c.	Éléments pour lesquels des armatures d'effort tranchant sont requises [6.2.3].....	63
d.	Vérification de la contrainte de compression dans les bielles de béton.....	64
e.	Valeur de calcul de l'effort tranchant agissant VEd.....	65
f.	Répartition des armatures transversales, détermination des espacements.....	67
g.	Décalage de la courbe enveloppe des moments de flexion [9.2.1.3] (2).....	69
3.	dispositions constructives.....	69
a.	Armatures d'effort tranchant [9.2.2].....	70
b.	Démarche calculatoire de projet :.....	71
c.	Organigramme général de la procédure de calcul.....	72
IX.	Ferrailage complet d'une poutre fléchie en flexion simple.....	73
X.	ANNEXES.....	75
1.	Avantages et inconvénients du matériau Béton armé.....	75
2.	Fiche module SST 5 PPN IUT Génie civil Construction Durable.....	76
3.	Calcul des longueurs d'ancrage.....	77
a.	Contrainte ultime d'adhérence [8.4.2].....	77
b.	Longueur d'ancrage de référence [8.4.3].....	78
c.	Longueur d'ancrage de calcul [8.4.4].....	79
d.	Ancrage des armatures d'effort tranchant et autres armatures transversales [8.5].....	80
e.	Ancrage au moyen de barres soudées [8.6].....	81
f.	Recouvrements et coupleurs [8.7].....	81
g.	Recouvrements et longueur de recouvrement [8.7.2] et [8.7.3].....	82
h.	Armatures transversales dans une zone de recouvrement [8.7.4].....	83
i.	Recouvrements des treillis soudés constitués de fils à haute adhérence [8.7.5].....	84
j.	Règles supplémentaires pour les barres de gros diamètre [8.8].....	85
k.	Paquets de barres [8.9].....	85
4.	Choix des sections d'armatures, nombre de barres par lit, diamètre nominal et réel.....	86
a.	Aires des sections d'acier pour armatures Haute Adhérence...tableau à compléter.....	86
b.	Diamètre moyen.....	86
c.	Nombre de barres par lit.....	87
d.	Moment réduit limite.....	88
XI.	Applications numériques.....	89
1.	Principe de ferrailage d'une poutre (TD N°1).....	89
2.	Flexion simple à l'État Limite Ultime (TD N°2).....	90
a.	Étude de cas N°1, section droite rectangulaire.....	90
b.	Étude de cas N°2, section droite en Té.....	91
c.	Étude de cas N°3, poutre de travaux pratiques.....	93
3.	Effort tranchant.....	95
a.	Armatures d'effort tranchant au voisinage des appuis.....	95
b.	Répartition des armatures transversales.....	97

# I. LISTE DES NOTATIONS EUROCODE 2

Les notations utilisées dans l' **EUROCODE 2** sont présentées dans la section 1 article [1.6]. Elles sont fondées sur la norme ISO 3898 :1987.

## Majuscules latines

- **A** Action accidentelle
- **A** Aire de la section droite
- **A<sub>c</sub>** Aire de la section droite du béton
- **A<sub>p</sub>** Aire de la section de l'armature ou des armatures de précontrainte
- **A<sub>s</sub>** Aire de la section des armatures de béton armé
- **A<sub>s,min</sub>** Aire de la section minimale d'armatures
- **A<sub>sw</sub>** Aire de la section des armatures d'effort tranchant
- **D** Diamètre du mandrin de cintrage
- **D<sub>Ed</sub>** Endommagement total dû à la fatigue
- **E** Effet des actions
- **E<sub>c</sub>, E<sub>c(28)</sub>** Module d'élasticité tangent à l'origine ( $\sigma_c = 0$ ) pour un béton de masse volumique normale à 28 jours
- **E<sub>c,eff</sub>** Module d'élasticité effectif du béton
- **E<sub>cd</sub>** Valeur de calcul du module d'élasticité du béton
- **E<sub>cm</sub>** Module d'élasticité sécant du béton
- **E<sub>c(t)</sub>** Module d'élasticité tangent à l'origine ( $\sigma_c = 0$ ) au temps  $t$  pour un béton de masse volumique normale
- **E<sub>p</sub>** Valeur de calcul du module d'élasticité de l'acier de précontrainte
- **E<sub>s</sub>** Valeur de calcul du module d'élasticité de l'acier de béton armé
- **EI** Rigidité en flexion
- **EQU** Equilibre statique
- **F** Action
- **F<sub>d</sub>** Valeur de calcul d'une action
- **F<sub>k</sub>** Valeur caractéristique d'une action
- **G<sub>k</sub>** Valeur caractéristique d'une action permanente
- **I** Moment d'inertie de la section de béton
- **L** Longueur
- **M** Moment fléchissant
- **M<sub>Ed</sub>** Valeur de calcul du moment fléchissant agissant
- **N** Effort normal
- **N<sub>Ed</sub>** Valeur de calcul de l'effort normal agissant (traction ou compression)
- **P** Force de précontrainte
- **P<sub>0</sub>** Force initiale à l'extrémité active de l'armature de précontrainte immédiatement après la mise en tension
- **Q<sub>k</sub>** Valeur caractéristique d'une action variable
- **Q<sub>fat</sub>** Valeur caractéristique de la charge de fatigue
- **R** Résistance
- **S** Efforts et moments internes (solllicitations)
- **S** Moment statique
- **SLS** Etat-limite de service (ELS)
- **T** Moment de torsion
- **T<sub>Ed</sub>** Valeur de calcul du moment de torsion agissant
- **ULS** Etat-limite ultime (ELU)
- **V** Effort tranchant
- **V<sub>Ed</sub>** Valeur de calcul de l'effort tranchant agissant

## Minuscules latines

- **a** Distance
- **a** Donnée géométrique
- **Δa** Tolérance pour les données géométriques
- **b** Largeur totale d'une section droite ou largeur réelle de la table d'une poutre en T ou en L
- **b<sub>w</sub>** Largeur de l'âme des poutres en T, en I ou en L
- **c<sub>nom</sub>** Enrobage nominal d'une armature
- **d** Diamètre ; Profondeur
- **d** Hauteur utile d'une section droite fléchie
- **d<sub>g</sub>** Dimension nominale supérieure du plus gros granulats
- **e** Excentricité
- **f<sub>c</sub>** Résistance en compression du béton
- **f<sub>cd</sub>** Valeur de calcul de la résistance en compression du béton
- **f<sub>ck</sub>** Résistance caractéristique en compression du béton, mesurée sur cylindre à 28 jours
- **f<sub>cm</sub>** Valeur moyenne de la résistance en compression du béton, mesurée sur cylindre
- **f<sub>ctk</sub>** Résistance caractéristique en traction directe du béton
- **f<sub>ctm</sub>** Valeur moyenne de la résistance en traction directe du béton
- **f<sub>p</sub>** Résistance en traction de l'acier de précontrainte
- **f<sub>pk</sub>** Résistance caractéristique en traction de l'acier de précontrainte
- **f<sub>p0,1</sub>** Limite d'élasticité conventionnelle à 0,1 % de l'acier de précontrainte
- **f<sub>p0,1k</sub>** Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,1 % de l'acier de précontrainte
- **f<sub>0,2k</sub>** Valeur caractéristique de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % de l'acier de béton armé
- **f<sub>t</sub>** Résistance en traction de l'acier de béton armé
- **f<sub>tk</sub>** Résistance caractéristique en traction de l'acier de béton armé
- **f<sub>y</sub>** Limite d'élasticité de l'acier de béton armé
- **f<sub>yd</sub>** Limite d'élasticité de calcul de l'acier de béton armé
- **f<sub>yk</sub>** Limite caractéristique d'élasticité de l'acier de béton armé
- **f<sub>ywd</sub>** Limite d'élasticité de calcul des armatures d'effort tranchant
- **h** Hauteur
- **h** Hauteur totale de la section droite
- **i** Rayon de giration
- **k** Coefficient ; Facteur
- **l** (ou l ou L) Longueur ; Portée
- **m** Masse
- **n** Coefficient
- **r** Rayon
- **1/r** Courbure en une section donnée
- **t** Epaisseur
- **t** Instant considéré
- **t<sub>0</sub>** Age du béton au moment du chargement
- **u** Périmètre de la section droite de béton dont l'aire est A<sub>c</sub>
- **u,v,w** Composantes du déplacement d'un point
- **x** Profondeur de l'axe neutre
- **x,y,z** Coordonnées
- **z** Bras de levier des forces internes

## Minuscules grecques

- $\alpha$  Angle ; Rapport
- $\beta$  Angle ; Rapport ; Coefficient
- $\gamma$  Coefficient partiel
- $\gamma_A$  Coefficient partiel relatif aux actions accidentelles A
- $\gamma_C$  Coefficient partiel relatif au béton
- $\gamma_F$  Coefficient partiel relatif aux actions F
- $\gamma_{C,fat}$  Coefficient partiel relatif à la fatigue du béton
- $\gamma_{F,fat}$  Coefficient partiel relatif aux actions de fatigue
- $\gamma_G$  Coefficient partiel relatif aux actions permanentes G
- $\gamma_M$  Coefficient partiel relatif à une propriété d'un matériau, tenant compte des incertitudes sur la propriété elle-même, sur les imperfections géométriques et sur le modèle de calcul utilisé
- $\gamma_P$  Coefficient partiel relatif aux actions associées à la précontrainte P
- $\gamma_Q$  Coefficient partiel relatif aux actions variables Q
- $\gamma_S$  Coefficient partiel relatif à l'acier de béton armé ou de précontrainte
- $\gamma_{S,fat}$  Coefficient partiel relatif à l'acier de béton armé ou de précontrainte sous chargement de fatigue
- $\gamma_f$  Coefficient partiel relatif aux actions, compte non tenu des incertitudes de modèle
- $\gamma_g$  Coefficient partiel relatif aux actions permanentes, compte non tenu des incertitudes de modèle
- $\gamma_m$  Coefficient partiel relatif à une propriété d'un matériau, seules les incertitudes sur la propriété du matériau étant prises en compte
- $\delta$  Incrément / coefficient de redistribution
- $\zeta$  Coefficient de réduction / coefficient de distribution
- $\epsilon_c$  Déformation relative en compression du béton
- $\epsilon_{c1}$  Déformation relative en compression du béton au pic de contrainte  $f_c$
- $\epsilon_{cu}$  Déformation relative ultime du béton en compression
- $\epsilon_u$  Déformation relative de l'acier de béton armé ou de précontrainte sous charge maximale
- $\epsilon_{uk}$  Valeur caractéristique de la déformation relative de l'acier de béton armé ou de précontrainte sous charge maximale
- $\theta$  Angle
- $\lambda$  Coefficient d'élançement
- $\mu$  Coefficient de frottement entre les armatures de précontrainte et leurs conduits
- $\nu$  Coefficient de Poisson
- $\nu$  Coefficient de réduction de la résistance du béton fissuré en cisaillement
- $\xi$  Rapport de la capacité d'adhérence des armatures de précontrainte à la capacité d'adhérence des armatures de béton armé
- $\rho$  Masse volumique du béton séché en étuve, en kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_{1000}$  Valeur de la perte par relaxation (en %), 1 000 heures après la mise en tension, à une température moyenne de 20°C
- $\rho_l$  Pourcentage d'armatures longitudinales
- $\rho_w$  Pourcentage d'armatures d'effort tranchant
- $\sigma_c$  Contrainte de compression dans le béton
- $\sigma_{cp}$  Contrainte de compression dans le béton due à un effort normal ou à la précontrainte
- $\sigma_{cu}$  Contrainte de compression dans le béton correspondant à la déformation ultime en compression  $\epsilon_{cu}$
- $\tau$  Contrainte tangente de torsion
- $\phi$  Diamètre d'une barre d'armature ou d'une gaine de précontrainte
- $\phi_n$  Diamètre équivalent d'un paquet de barres
- $j(t, t_0)$  Coefficient de fluage, définissant le fluage entre les temps  $t$  et  $t_0$ , par rapport à la déformation élastique à 28 jours
- $j(\infty, t_0)$  Valeur finale du coefficient de fluage
- $\psi$  Coefficients définissant les valeurs représentatives des actions variables  $\psi_0$  pour les valeurs de combinaison,  $\psi_1$  pour les valeurs fréquentes et  $\psi_2$  pour les valeurs quasi-permanentes

# IV. DURABILITÉ ET ENROBAGE DES ARMATURES

Section 4 de l' Eurocode 2

## 1. généralités [4.1]

(1)P Une structure durable doit satisfaire aux exigences d'aptitude au service, de résistance et de stabilité pendant toute la durée d'utilisation de projet, sans perte significative de fonctionnalité ni maintenance imprévue excessive (pour les exigences générales voir également l'EN1990).

(2)P La protection requise de la structure doit être établie en considérant l'utilisation prévue, la durée d'utilisation de projet (voir l'EN 1990), le programme de maintenance envisagé ainsi que les actions attendues.

(3)P L'importance éventuelle des actions directes et indirectes, des conditions d'environnement (4.2) et des effets qui en résultent doit être prise en considération.

## 2. Conditions d'environnement [4.2]

(1)P Les conditions d'exposition sont les conditions physiques et chimiques auxquelles la structure est exposée, en plus des actions mécaniques.

(2)Les conditions d'environnement sont classées conformément au Tableau 4.1, basé sur l'EN 206-1.

(3)En plus des conditions du Tableau 4.1, il convient de considérer certaines formes particulières d'actions agressives ou d'actions indirectes :

- attaque chimique due par exemple à :
  - utilisation du bâtiment ou de l'ouvrage (stockage de liquides, etc.)
  - acides ou sulfates en solution (EN 206-1, ISO 9690)
  - chlorures contenus dans le béton (EN 206-1)
  - réactions alcali-granulats (EN 206-1, Normes Nationales)
- attaque physique due par exemple à :
  - variation de température
  - abrasion (voir 4.4.1.2 (13))
  - pénétration d'eau (EN 206-1).

L' Annexe E de l' Eurocode 2 donne des classes de résistance indicatives pour les différentes classes d'exposition. Ceci peut conduire à choisir des classes de résistance supérieures à celles requises par le calcul structural. Dans ce cas, il convient d'adopter pour  $f_{ctm}$  la résistance la plus élevée pour le calcul du ferrailage minimal et la maîtrise de l'ouverture des fissures (voir 7.3.2 et 7.3.4).

L'annexe E de l' Eurocode 2 donne les classes indicatives de résistance pour la durabilité.

(1) Le choix d'un béton à durabilité convenable pour la protection du béton et la protection des armatures de béton armé vis-à-vis de la corrosion passe par la considération de sa composition. Ceci peut amener à une résistance à la compression du béton plus élevée que celle exigée pour le dimensionnement de la structure. Le lien entre les classes de résistance du béton et les classes d'exposition (voir le Tableau 4.1) peut être décrit par des classes indicatives de résistance.

(2) Quand la résistance choisie est plus élevée que celle exigée par le dimensionnement de la structure, il convient d'utiliser la valeur de calcul de  $f_{ctm}$  associée à la valeur élevée de la résistance dans le calcul du ferrailage minimal selon 7.3.2 et 9.1.1.1 et dans la maîtrise de l'ouverture des fissures selon 7.3.3 et 7.3.4.



Tableau IV.1 : Classes d'exposition en fonction des conditions d'environnement (EN 206-1) [Tab 4.1]

Désignation de la classe	Description de l'environnement :	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
<b>1 Aucun risque de corrosion ni d'attaque</b>		
X0	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaque chimique Béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : très sec	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible
<b>2 Corrosion induite par carbonatation</b>		
XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau
XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau Un grand nombre de fondations
XC3	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie
XC4	Alternativement humide et sec	Surfaces de béton soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2
<b>3 Corrosion induite par les chlorures</b>		
XD1	Humidité modérée	Surfaces de béton exposées à des chlorures transportés par voie aérienne
XD2	Humide, rarement sec	Piscines. Éléments en béton exposés à des eaux industrielles contenant des chlorures
XD3	Alternativement humide et sec	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées, Dalles de parcs de stationnement de véhicules
<b>4 Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer</b>		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte
XS2	Immergé en permanence	Éléments de structures marines
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	Éléments de structures marines
<b>5 Attaque gel/dégel</b>		
XF1	Saturation modérée en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de béton exposées à la pluie et au gel
XF2	Saturation modérée en eau, avec agents de déverglaçage	Surfaces verticales de béton des ouvrages routiers exposés au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage
XF3	Forte saturation en eau, sans agents de déverglaçage	Surfaces horizontales de béton exposées à la pluie et au gel
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage Surfaces de béton verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel
<b>6 Attaques chimiques</b>		
XA1	Environnement à faible agressivité chimique selon l'EN206-1, Tableau 2	Sois naturels et eau dans le sol
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée selon l'EN206-1, Tableau 2	Sois naturels et eau dans le sol
XA3	Environnement à forte agressivité chimique selon l'EN206-1, Tableau 2	Sois naturels et eau dans le sol

**NOTE** La composition du béton affecte à la fois la protection des armatures et la résistance du béton aux attaques.

Tableau IV.2 : **Classes indicatives de résistance [Tab E.1N]**

Classes d'exposition selon le Tableau 4.1 de l'EN 206-1										
Corrosion										
	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures			Corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Classe indicative de résistance	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37		C35/45
Dommages au béton										
	Aucun risque	Attaque par gel dégel			Attaque chimique					
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3			
Classe indicative de résistance	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37		C35/45			

### 3. Exigences de durabilité [4.3]

(1)P Pour atteindre la durée d'utilisation de projet requise pour la structure, des dispositions appropriées doivent être prises afin de protéger chaque élément structural des actions d'environnement concernées.

(2)P Les exigences de durabilité doivent être prises en compte dans :

- la conception de la structure,
- le choix des matériaux,
- les dispositions constructives,
- l'exécution,
- la maîtrise de la qualité,
- les inspections,
- les vérifications,
- les dispositions particulières (utilisation d'acier inoxydable, revêtements, protection cathodique).

### 4. Méthodes de vérification [4.4]

Les vérifications portent sur la valeur de l'enrobage des armatures et la fissuration de la pièce en béton armé.

#### a. Calcul de l'enrobage[4.4.1]

(1)P L'enrobage est la distance entre la surface de l'armature (épingles, étriers et cadres compris, ainsi que armatures de peau, le cas échéant) la plus proche de la surface du béton et cette dernière.

(2)P L'enrobage nominal doit être spécifié sur les plans. Il est défini comme l'enrobage minimal  $c_{min}$  (voir [4.4.1.2]) plus une marge de calcul pour tolérances d'exécution  $\Delta c_{dev}$  (voir [4.4.1.3]) :

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad \dots (4.1)$$

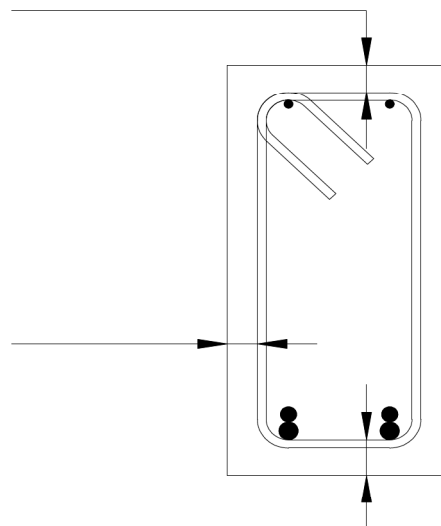


Illustration 5 : définition de l'enrobage [4.4.1]

### b. Enrobage minimal, $c_{min}$ [4.4.1.2]

(1)P Un enrobage minimal  $c_{min}$  doit être assuré afin de garantir :

- la bonne transmission des forces d'adhérence (voir également sections 7 et 8)
- la protection de l'acier contre la corrosion (durabilité)
- une résistance au feu convenable (voir EN 1992-1-2).

(2)P La valeur à utiliser est la plus grande valeur de  $c_{min}$  satisfaisant aux exigences à la fois en ce qui concerne l'adhérence et les conditions d'environnement.

$$c_{min} = \max \{c_{min,b} ; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add} ; 10 \text{ mm}\} \quad \dots (4.2)$$

- $c_{min,b}$  enrobage minimal vis-à-vis des exigences d'adhérence, voir 4.4.1.2 (3)
- $c_{min,dur}$  enrobage minimal vis-à-vis des conditions d'environnement, voir 4.4.1.2 (5)
- $\Delta c_{dur,\gamma}$  marge de sécurité, voir 4.4.1.2(6)
- $\Delta c_{dur,st}$  réduction de l'enrobage minimal dans le cas d'acier inoxydable, voir 4.4.1.2 (7)
- $\Delta c_{dur,add}$  réduction de l'enrobage minimal dans le cas de protection supplémentaire, voir 4.4.1.2 (8).

**Remarque** Dans les cas courants et sans indication supplémentaire  $c_{min} = \max \{c_{min,b} ; c_{min,dur} ; 10 \text{ mm}\}$

(3)Pour assurer à la fois une transmission sans risque des forces d'adhérence et un béton suffisamment compact, il convient que l'enrobage minimal ne soit pas inférieur à  $c_{min,b}$  donné dans le Tableau 4.2.

### c. Enrobage minimal $C_{min,b}$ requis vis à vis de l'adhérence

L'adhérence acier béton est assurée, entre autre, si l'enrobage de l'armature est suffisant. Cet enrobage requis vis à vis de l'adhérence ne conditionne pas nécessairement la durabilité à lui seul vis à vis des agressions que peut subir la structure dans sa durée d'exploitation ou de vie.

Tableau IV.3 : Enrobage minimal  $c_{min,b}$  requis vis à vis de l'adhérence[Tab 4.2]

Exigences vis à vis de l'adhérence	
Disposition des armatures	Enrobage minimal $c_{min,b}$ *
Armature individuelle	Diamètre de la barre
Paquet	Diamètre équivalent ( $\varnothing_n$ ) donné en [8.9.1]
* Si la dimension nominale du plus gros granulats est supérieure à 32 mm, il convient de majorer $c_{min,b}$ de 5 mm	

### d. Enrobage minimal $C_{min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité

Notion de classe structurale : L' Eurocode 2 définit **6 classes structurales**, S1 à S6. La valeur de l'enrobage minimal requis vis à vis de la durabilité,  $c_{min,dur}$ , croît avec la classe structurale.

Les classes structurales et les valeurs de  $c_{min,dur}$  à utiliser dans un pays donné peuvent être fournies par son Annexe Nationale. **La Classe Structurale recommandée** (durée d'utilisation de projet de 50 ans) **est la classe S4**, pour les résistances indicatives du béton données à l'Annexe E ; le Tableau 4.3N donne les modifications de Classe Structurale recommandées. La Classe Structurale minimale recommandée est la classe S1. Les valeurs recommandées de  $c_{min,dur}$  sont données dans le Tableau 4.4N pour les armatures de béton armé.

Tableau IV.4 : Classification structurale recommandée [Tab 4.3N]

Classe structurale							
Critère	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Durée d'utilisation de projet de 100 ans	Majoration de 2 classes						
Classe de résistances 1) 2)	≥ C30/37 minoration de 1 classe	≥ C30/37 minoration de 1 classe	≥ C35/45 minoration de 1 classe	≥ C40/50 minoration de 1 classe	≥ C40/50 minoration de 1 classe	≥ C40/50 minoration de 1 classe	≥ C45/55 minoration de 1 classe
Élément assimilable à une dalle (position des armatures non affectée par le processus de construction)	Minoration de 1 classe						
Maîtrise particulière de la qualité de production du béton	Minoration de 1 classe						

**Notes relatives au Tableau 4.3N**

On considère que la classe de résistance et le rapport E/C sont liés. Il est possible de considérer une composition particulière (type de ciment, rapport E/C, fines) afin d'obtenir une faible perméabilité. La limite peut être réduite d'une classe de résistance si l'air entraîné est supérieur à 4%.

Tableau IV.5 : Valeurs de l'enrobage minimal  $c_{min,dur}$  requis vis-à-vis la durabilité<sup>5</sup> [Tab 4.4N]

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
<b>S4</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Il convient de majorer l'enrobage d'une marge de sécurité  $\Delta c_{dur,y}$ .

**NOTE:** La valeur de  $\Delta c_{dur,y}$  à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée est  $\Delta c_{dur,y} = 0$  mm. L'enrobage minimal peut être réduit de  $\Delta c_{dur,st}$  lorsqu'on utilise de l'acier inoxydable ou que l'on prend d'autres dispositions particulières. Dans ce cas, il convient d'en considérer les effets pour l'ensemble des propriétés des matériaux concernées, y compris l'adhérence.

**NOTE:** La valeur de  $\Delta c_{dur,st}$  à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée, en l'absence de spécifications supplémentaires, est  $\Delta c_{dur,st} = 0$  mm. Dans le cas d'un béton bénéficiant d'une protection supplémentaire (revêtement, par exemple), l'enrobage minimal peut être réduit de  $\Delta c_{dur,add}$ .

**NOTE:** La valeur de  $\Delta c_{dur,add}$  à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée, en l'absence de spécifications supplémentaires, est  $\Delta c_{dur,add} = 0$  mm.

<sup>5</sup> dans le cas des armatures de béton armé conformes à l'EN 10080

**e. Prise en compte des tolérances d'exécution  $\Delta c_{dev}$  [4.4.1.3]**

(1) Pour le calcul de l'enrobage nominal  $c_{nom}$ , l'enrobage minimal **doit être majoré**, au niveau du projet, pour tenir compte des tolérances pour écart d'exécution ( $\Delta c_{dev}$ ). Ainsi, l'enrobage minimal doit être augmenté de la valeur absolue de l'écart adopté susceptible de le réduire .

**NOTE :** La valeur de  $\Delta c_{dev}$  à utiliser dans un pays donné peut être fournie par son Annexe Nationale. La valeur recommandée est  **$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$** .

(2) Pour les bâtiments, l'écart adopté est donné par l'ENV 13670-1. Il est également suffisant, normalement, pour les autres types de structures. Il convient d'en tenir compte lors du choix de l'enrobage nominal de calcul. Il convient d'utiliser l'enrobage nominal de calcul dans les calculs et de l'indiquer sur les plans, à moins qu'une valeur autre que l'enrobage nominal soit spécifiée (valeur minimale par exemple).

(3) Dans certains cas, l'écart d'exécution adopté, et par conséquent la tolérance  $\Delta c_{dev}$ , peuvent être réduits.

**NOTE :** La réduction de  $\Delta c_{dev}$  à utiliser, dans ces cas, dans un pays donné, peut être fournie par son Annexe Nationale. Les valeurs recommandées sont les suivantes :

• lorsque la fabrication est soumise à un système d'assurance de la qualité dans lequel la surveillance inclut des mesures de l'enrobage des armatures, il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérances d'exécution  $\Delta c_{dev}$  de telle sorte que :

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 5 \text{ mm} \quad \dots (4.3N)$$

• lorsqu'on peut garantir l'utilisation d'un appareil de mesure très précis pour la surveillance ainsi que le rejet des éléments non conformes (éléments préfabriqués, par exemple), il est possible de réduire la marge de calcul pour tolérances d'exécution  $\Delta c_{dev}$  de telle sorte que :

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm} \quad \dots (4.4N)$$

**Remarque :** Les écarts sur les dimensions des sections sont normalement pris en compte dans les coefficients partiels relatifs aux matériaux (NOTE du premier alinéa de l'article 5.2 de l'Eurocode 2). Il n'y a donc pas lieu d'inclure ces imperfections dans l'analyse structurale. La valeur de  $\Delta c_{dev}$  n'a rien à voir avec une imperfection géométrique sur la section elle-même, seulement sur l'enrobage.