



Chapitre

4

Pour une armature conforme

4.1 Contexte réglementaire

4.2 Caractéristiques certifiées des aciers

4.3 Conformité des armatures

4.4 Certifications gérées par l'AF CAB

La conformité finale de l'armature au sein de l'ouvrage est conditionnée par :

- la conformité du calcul et de la conception ;
- la conformité des matériaux utilisés ;
- la conformité de la fabrication de l'armature ;
- la conformité de la pose en coffrage.

Du point de vue des responsabilités, chacun de ces quatre points incombe à des intervenants différents. Le premier concerne les bureaux d'étude, le deuxième les fabricants d'aciers, le troisième les armaturiers et le quatrième les entreprises assurant la pose, spécialisées ou non dans cette activité.

Au plan pratique, le calcul est bien le domaine exclusif des bureaux d'étude, mais la conception (choix des formes et de la disposition des armatures) doit prendre en compte les moyens et les méthodes de fabrication et de pose en coffrage.

D'ailleurs, les règles de certification de l'AFCAB, imposent aux armaturiers d'analyser les plans qu'ils reçoivent, de signaler les dispositions qui leur paraissent anormales et de proposer des solutions alternatives, si ce qui est prévu est trop difficile ou impossible à réaliser. Cette démarche nécessite la connaissance des règles de l'art relatives à la conception des armatures.

Ce chapitre traite de tous les aspects de la conformité des armatures à l'exception du calcul proprement dit.

4.1 Contexte réglementaire

Réaliser une armature « conforme » implique naturellement de se référer à des normes et à des textes réglementaires. Un nouveau contexte normatif et réglementaire se met progressivement en place. La période où le présent document est rédigé correspond à d'importants changements dans ce domaine, et cette mutation nécessitera encore de nombreux mois. La mise en application des nouveaux référentiels ne fera pas oublier instantanément les anciens. Il est donc nécessaire d'explicitier clairement les modifications en cours et à venir.

L'évolution essentielle est bien entendu la mise en application de l'Eurocode 2 (NF EN 1992) version 2004. Cette nouvelle norme de base concernant le calcul des structures en béton remplacera les règles BAEL 91 révisées 99 et les règles BPEL. Au moment de la rédaction de ce guide le projet d'Annexe Nationale qui l'accompagne est daté de mars 2005.

L'Eurocode 2 n'est pas le seul nouveau document normatif. Il renvoie en particulier à diverses normes européennes qui ne sont pas encore toutes au stade définitif. D'autres textes devront être révisés dans un souci de cohérence et d'homogénéité. La situation risque d'être pendant quelque temps évolutive. Cette période de transition demandera donc une attention particulière de la part de tous les intervenants.

Ceci nécessite, dans ce document, de faire référence à la fois à des textes français et à des textes européens.

Les tableaux suivants ont pour but de synthétiser les évolutions du contexte normatif d'une part pour les aciers et d'autre part pour les armatures.

Les Eurocodes sont des normes européennes de conception et de calcul pour les bâtiments et les ouvrages de génie civil. Ces normes ont pour objet d'harmoniser les règles de conception et de calcul au sein des différents états de la communauté européenne et de contribuer à la création du marché unique de la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil.

Les Eurocodes forment un ensemble cohérent et homogène de 59 normes :

- faisant appel à une approche unique, semi-probabiliste avec des méthodes de dimensionnement selon les états limites ;
- appliquées aux différents matériaux (béton, acier, mixte, bois, aluminium) et aux divers types de constructions.

Ils harmonisent les « codes de calcul » des différents états membres et remplaceront à terme les règles en vigueur dans chacun de ces états.

Dans chaque pays, l'Annexe Nationale définit les conditions d'application de la norme européenne. Elle permet de tenir compte des particularités géographiques, géologiques ou climatiques ainsi que des niveaux de protection spécifiques à chaque pays. En particulier, les Eurocodes prévoient que certains paramètres sont déterminés au niveau national. L'Annexe Nationale contient les informations nécessaires sur ces paramètres.

Tableau n° 1 : aciers pour l'armature du béton

Normes et textes réglementaires applicables fin 2004	Nouvelles références normatives et réglementaires
<p>NFA 35-015: Armatures pour béton armé Ronds lisses soudables.</p> <p>NFA 35-016: Armatures pour béton armé Barres et couronnes soudables à verrous de nuance FeE500 Treillis soudés constitués de ces armatures</p> <p>NFA 35-017: Armatures pour béton armé Barres et fils machine non soudables à verrous.</p> <p>NFA 35-019-1: Armatures pour béton armé Armatures constituées de fils soudables à empreintes Partie 1: Barres et couronnes.</p> <p>NFA 35-019-2: Armatures pour béton armé Armatures constituées de fils soudables à empreintes Partie 2: Treillis soudés.</p> <p>NFA 35-020-1: Produits en acier. Dispositifs de rabouillage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton. Partie 1: Prescriptions relatives aux performances mécaniques.</p> <p>NFA 35-021: Aciers pour béton. Fils soudables utilisés pour la fabrication d'armatures pour béton.</p> <p>NFA 35-024: Aciers pour béton. Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm.</p> <p>XP A 35-014: Aciers pour béton armé Barres, fils machines et fils lisses en acier inoxydable.</p> <p>XP A 35-025: Produits en acier Barres et couronnes pour béton armé galvanisés à chaud Fils destinés à la fabrication d'armatures pour béton armé galvanisées à chaud.</p> <p>XP A 35-031: Armatures pour béton armé Barres soudables à verrous de diamètre supérieur à 40 mm.</p> <p>Les normes ci-dessus précisent l'ensemble des prescriptions et des conditions de contrôle pour chacune des catégories d'acier visée. À fin 2004, ce sont les normes de référence des règles de certification de l'ARCAB.</p>	<p>EN 10080 Aciers pour l'armature du béton. Acier soudable pour béton armé. Généralités. Cette norme est le support pour le marquage CE des aciers pour béton armé soudables, qu'ils soient lisses, à empreintes ou à verrous. Cependant, elle ne contient pas de niveau de performance des produits et doit être utilisé en liaison avec une « spécification de produit ». Cette spécification peut être d'origine européenne (TS 10081, Annexe C de l'Eurocode 2, NF EN 1992-1-1 ou Annexe N de la norme NF EN 13369), ou d'origine nationale (NF A35-015, NF A 35-016, NF A 35-019 ou NF A 35-024), ou encore être propre à un producteur ou un utilisateur. En revanche, les normes XP A 35-014, NF A 35-017, NF A 35-020-1, NF A 35-021 et XP A 35-025 ne concernent pas les aciers pour béton armé soudables et ne relèvent donc pas de la norme EN 10080</p> <p>NF EN 1992 (Eurocode 2) Calcul des structures en béton. Partie 1-1: Règles générales et règles pour le bâtiment, cette norme comprend une Annexe Nationale À travers les exigences qu'il formule pour le calcul, ce texte donne les principes et les règles applicables aux aciers. Pour les spécifications détaillées il se réfère à la norme EN 10080</p> <p>NF EN 13369 Règles communes pour les produits préfabriqués en béton Annexe N Propriétés des barres ou fils à empreintes Cette norme définit les caractéristiques dimensionnelles des empreintes en application de la norme EN 10080.</p>
<p>Marchés publics de travaux. Cahier de clauses techniques générales Fascicule 65 A (août 2000) Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension. Ce texte concerne exclusivement l'exécution des travaux. Il se réfère aux normes ci-dessus.</p>	<p>Marchés publics de travaux. Cahier de clauses techniques générales Fascicule 65 A (nouvelle version) Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension. Ce texte dans sa nouvelle version sera en cohérence avec le nouveau contexte réglementaire.</p>
<p>NFP 18-201 (référence DTU 21) Travaux de bâtiment Exécution des ouvrages en béton Cahier des clauses techniques. Cette norme DTU concerne exclusivement l'exécution des travaux. Elle se réfère aux normes ci-dessus.</p>	<p>ENV 13670-1 Exécution des ouvrages en béton Ce projet de norme européenne est l'équivalent de la norme NFP 18-201. Il se réfère aux normes EN ci-dessus</p>

Tableau n° 2 : armatures du béton

Normes et textes réglementaires applicables fin 2004	Nouvelles références normatives et réglementaires
<p>Règles BAEL 91 révisées 99 Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites. Ce texte est essentiellement consacré au calcul, mais il contient aussi des prescriptions sur les enrobages, les armatures, les rayons distances entre les armatures, la poussée au vide, les façonnages et la fermeture des cadres.</p>	<p>NF EN 1992 (Eurocode 2) Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour le bâtiment. Cette norme comprend une Annexe Nationale. À travers les exigences qu'il formule pour le calcul, ce texte donne en particulier les principes et les règles applicables au façonnage, à l'enrobage et aux distances entre les armatures.</p>
<p>NFA 35-027 (janvier 2003) Produits en acier pour béton armé. Armatures. Les prescriptions de cette norme concernent l'ensemble des caractéristiques des armatures. Elles ne s'appliquent qu'en l'absence de spécifications différentes mentionnées sur les plans ou dans les pièces écrites visant les armatures.</p>	<p>NFA 35-027 (nouvelle version) Produits en acier pour béton armé. Armatures. Les prescriptions de cette norme concernent l'ensemble des caractéristiques des armatures. Elles ne s'appliquent qu'en l'absence de spécifications différentes mentionnées sur les plans ou dans les pièces écrites visant les armatures. Elle devrait donc conserver sa place dans le nouvel ensemble réglementaire.</p>
<p>Marchés publics de travaux. Cahier de clauses techniques générales. Fascicule 65 A (août 2000). Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension. Ce texte concerne exclusivement l'exécution des travaux. On y trouve en particulier des prescriptions relatives aux diverses opérations de fabrication et de pose en coffrage des armatures pour les ouvrages de génie civil.</p>	<p>Marchés publics de travaux. Cahier de clauses techniques générales. Fascicule 65 A (nouvelle version). Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension. Ce texte dans sa nouvelle version sera en cohérence avec le nouveau contexte réglementaire.</p>
<p>NF P 06-013 Règles PS 92 Règles de construction parasismique et NF P 06-014 Règles PS MI 89/92: Construction parasismique des maisons individuelles et des bâtiments assimilés. Ces règles contiennent les prescriptions complémentaires spécifiques aux constructions parasismiques, chacune dans son domaine d'application.</p>	<p>NF EN 1992 (Eurocode 2) Partie 2: Ponts en béton armé et en béton précontraint Ce texte donne les prescriptions complémentaires à la norme NF EN 1992 Partie 1-1 spécifiques pour le calcul des ponts.</p> <p>NF EN 1998 (Eurocode 8) Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, dans le cas de la construction de structures en béton dans des régions sismiques. Ce texte donne les prescriptions complémentaires à la norme NF EN 1992 partie 1-1 aux constructions parasismiques</p>
<p>NF P 92-701 Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton. À travers les exigences qu'elle formule pour le calcul, cette norme donne des prescriptions concernant la mise en œuvre des armatures dans les structures devant résister au feu.</p>	<p>NF EN 1992 (Eurocode 2) Calcul des structures en béton. Partie 1-2: Calcul du comportement au feu. À travers les exigences qu'elle formule pour le calcul, cette norme donne des prescriptions spécifiques concernant la mise en œuvre des armatures dans les structures devant résister au feu complémentaires à celles de la norme NF EN 1992-1-1.</p>
<p>NF P 18-201 (référence DTU 21) Travaux de bâtiment. Exécution des ouvrages en béton. Cahier des clauses techniques. Cette norme DTU concerne exclusivement l'exécution des travaux. Elle se réfère aux normes ci-dessus.</p>	<p>ENV 13670-1 Exécution des ouvrages en béton Ce projet de norme européenne est l'équivalent de la norme NF P 18-201. Il se réfère aux normes EN ci dessus.</p>

4.2 Caractéristiques certifiées des aciers

Les prescriptions relatives aux aciers se traduisent dans les normes par les caractéristiques spécifiées suivantes :

- soudabilité et composition chimique ;
- caractéristiques mécaniques en traction ;
- diamètres, sections, masses linéiques et tolérances ;
- adhérence et géométrie de la surface (verrous ou empreintes) ;
- non fragilité (aptitude au pliage) ;
- dimensions et résistance au cisaillement des assemblages soudés des treillis soudés ;
- résistance à la fatigue (caractéristique optionnelle) ;
- aptitude au redressage après pliage (caractéristique optionnelle).

4.2.1 - Soudabilité et composition chimique

Un acier est dit « soudable » s'il est possible de l'assembler par soudure, par des procédés courants, sans altérer ses caractéristiques mécaniques. La soudabilité d'un acier est attestée par sa composition chimique. Les normes fixent les valeurs qui ne doivent pas être dépassées concernant les teneurs en carbone, soufre, phosphore, azote et cuivre, ainsi qu'une combinaison des teneurs en carbone, manganèse, chrome, molybdène, vanadium, nickel et cuivre appelée carbone équivalent.

4.2.2 - Caractéristiques mécaniques en traction

Limite d'élasticité R_e

Le diagramme contrainte-déformation des aciers laminés à chaud comporte un palier de ductilité qui met en évidence la limite d'élasticité supérieure d'écoulement R_{eH} qui est aussi la limite apparente d'élasticité R_e .

Le diagramme contrainte-déformation des aciers laminés à froid ne comporte pas de palier. Dans ce cas, la limite apparente d'élasticité R_e est fixée conventionnellement égale à la contrainte correspondant à 0,2 % d'allongement rémanent.

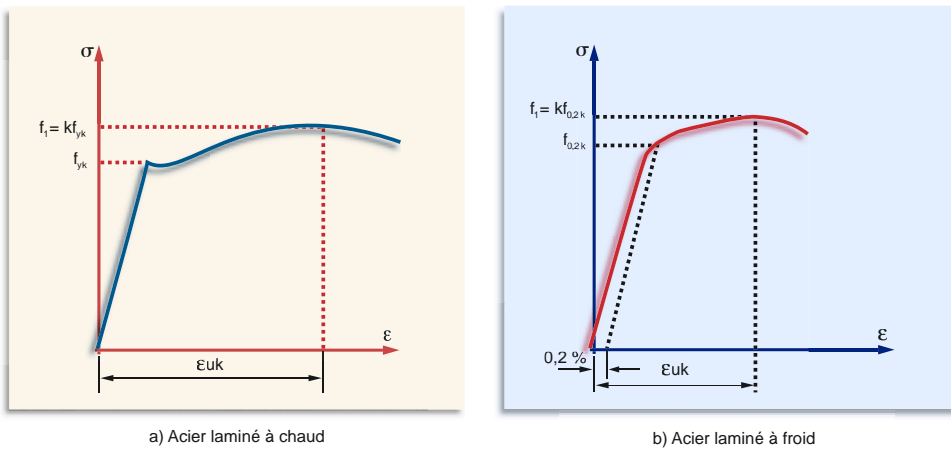


Figure n° 11 : diagrammes des contraintes-déformations types d'acier pour béton armé.

Actuellement en France, on utilise des aciers de 500 MPa de limite d'élasticité. L'Eurocode 2 Partie 1-1 prévoit au paragraphe 3.2.2.3 une plage de limite d'élasticité comprise entre 400 MPa et 600 MPa.

Caractéristiques de ductilité R_m/R_e et A_{gt}

Les normes françaises fixent des valeurs minimales pour le rapport résistance à la traction/limite d'élasticité (R_m/R_{eH}), et pour l'allongement sous charge maximale (A_{gt}). Elles distinguent deux « catégories » d'aciers qui correspondent à des caractéristiques de ductilité différentes.

Tableau n° 3 : classes de ductilité des aciers FeE500-2 et FeE500-3 selon la norme NF A 35-016

Acier	Limite supérieure découlement R_{eH} en MPa		Rapport R_m/R_{eH}		Allongement total sous charge maximale A_{gt} en %	
	Valeur du fractile	Borne inférieure	Valeur du fractile	Borne inférieure	Valeur du fractile	Borne inférieure
FeE500-2	500	475	1,03	1,01	2,5	2
FeE500-3	500	475	1,08	1,05	5	4

R_m : résistance à la traction.

Dans la suite du texte, les spécifications du nouveau contexte réglementaire sont repérées par un trait vertical orange.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 prévoit trois classes de ductilité : A, B, C. Le tableau C1 de son Annexe C reproduit par notre tableau n° 4 précise les caractéristiques correspondant à ces trois classes.

Tableau n° 4 : classes de ductilité (A, B et C) selon l'Eurocode 2 Partie 1-1								
Forme du produit		Barres et fils redressés			Treillis soudés			Exigence ou valeur du fractile
Classe de ductilité		A	B	C	A	B	C	-
Limite caractéristique d'élasticité f_{yk} ou $f_{0,2k}$ (en MPa)		400 à 600						5,0 %
Valeur minimale de $k = (f_t/f_y)_k$		$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10,0 %
Valeur caractéristique de la déformation relative sous charge maximale, ϵ_{uk} (en %)		$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10,0 %
Aptitude au pliage		Essai de pliage-dépliage			-			
Résistance au cisaillement		-			$0,3 A f_{yk}$ (A est l'aire du fil)			Minimum
Tolérance maximale vis-à-vis de la masse nominale (barre ou fil individuel) (en %)	Dimension nominale de la barre (en mm)							5,0 %
	≤ 8				$\pm 6,0$			
	> 8				$\pm 4,5$			

Il appartient aux concepteurs de préciser leur choix dans le cas où la nature des ouvrages ou leurs conditions d'exploitation nécessitent l'emploi d'un acier de classe de ductilité spécifique. L'Eurocode 2 Partie 2 prescrit pour les ponts l'emploi d'aciers de classe B ou C. L'Eurocode 8, qui définit les règles de calcul des constructions pour leur résistance aux séismes, impose l'emploi d'aciers de classe de ductilité B et parfois C dans certaines parties des structures assurant la résistance aux séismes. La classe exigée dépend de la classe de ductilité du bâtiment. Dans tous les cas la classe de ductilité de l'acier préconisée par le bureau d'études doit figurer clairement sur les plans et être scrupuleusement respectée.

4.2.3 - Diamètres, sections, masses linéiques et tolérances

Compte tenu de la présence des reliefs (verrous ou empreintes), la section d'un acier à haute adhérence n'est pas tout à fait circulaire. Les normes fixent cependant des « diamètres nominaux d » qui correspondent à des « sections nominales A_n » (aire du cercle ayant le même diamètre nominal) et à des « masses linéiques nominales » calculées sur la base d'une masse volumique de $7,85 \text{ kg/dm}^3$ *. La valeur de la masse linéique est assortie d'une tolérance.

Les diamètres prévus par la norme EN 10080 sont donnés dans le tableau n° 5. La mention de diamètres « préférentiels » a pour but de limiter le nombre de références à fabriquer et à stocker, et d'éviter des difficultés dans l'identification et le contrôle des armatures. Les diamètres utilisés dans chaque pays sont actuellement différents. En France, on se limite en pratique aux diamètres 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14 et 16 pour les couronnes et 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32, et 40 pour les barres.

Tableau n° 5: diamètres nominaux préférentiels sections et masse linéiques nominales

Diamètre nominal en mm	Barres	Couronnes et produits déroulé	Treillis soudés	Section nominale en mm²	Masse linéique nominale en kg/m
4,0		x		12,6	0,099
4,5		x		15,9	0,125
5,0		XX	x	19,6	0,154
5,5		x	x	23,8	0,187
6,0	XX	XX	x	28,3	0,222
6,5		x	x	33,2	0,260
7,0		XX	x	38,5	0,302
7,5		x	x	44,2	0,347
8,0	XX	XX	x	50,3	0,395
8,5		x	x	56,7	0,445
9,0		x	x	63,6	0,499
9,5		x	x	70,9	0,556
10,0	XX	XX	x	78,5	0,617
11,0		x	x	95,0	0,746
12,0	XX	XX	x	113,0	0,888
14,0	XX	XX	x	154,0	1,210
16,0	XX	XX	x	201,0	1,580
20,0	XX			314,0	2,470
25,0	XX			491,0	3,850
28,0	XX			616,0	4,830
32,0	XX			804,0	6,310
40,0	XX			1257,0	9,860
50,0	x			1963,0	15,400

Les diamètres pratiquement utilisés en France sont repérés par **XX en gras**

* Pour les aciers inoxydables la masse volumique dépend de la composition de l'acier. Elle est comprise entre $7,7$ et $8,0 \text{ kg/dm}^3$.

4.2.4 - Adhérence et géométrie de la surface

Les normes imposent à la géométrie de surface des aciers des caractéristiques permettant d'assurer une adhérence convenable (voir figures n° 1 et 2 dans le chapitre 2). Les exigences portent sur des valeurs minimales soit de hauteur des verrous, ou de profondeur des empreintes, soit de « surface relative » des verrous f_R^* , ou des empreintes f_p .

4.2.5 - Non fragilité (aptitude au pliage)

L'acier est soumis à un pliage, sur un mandrin dont le diamètre est fixé en fonction de celui de l'acier suivi d'un dépliage. L'essai est satisfaisant s'il ne se produit ni cassure ni fissure transversale dans la zone de pliage-dépliage.

4.2.6 - Dimensions et résistance au cisaillement des assemblages soudés des treillis soudés

Les dimensions des treillis soudés font partie des caractéristiques certifiées. Il s'agit des longueurs et largeurs des treillis soudés, de l'espacement des fils, des longueurs d'abouts, des diamètres relatifs des fils.

La résistance des assemblages soudés au cisaillement étant spécifiée, il est possible de les prendre en compte dans les calculs mettant en jeu l'ancrage ou les recouvrements des treillis soudés.

** La surface relative des verrous (ou des empreintes) est égale à l'aire de la projection de l'ensemble des verrous (ou des empreintes) sur un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal de la barre divisée par l'espacement des verrous et la circonférence nominale de l'armature.*

4.2.7 - Résistance à la fatigue

Cette caractéristique n'est exigée que de façon exceptionnelle. Elle se contrôle à partir d'un essai de traction ondulée.

4.2.8 - Aptitude au redressage après pliage

Cette caractéristique optionnelle peut faire l'objet d'une attestation sur demande du producteur d'acier. Elle concerne les aciers de diamètre au plus égal à 16 mm. Les règles de certification de la marque NF – Aciers pour béton armé définissent la procédure de vérification de l'aptitude au redressage après pliage.

4.3 Conformité des armatures

Chaque opération du cycle de production des armatures décrite au chapitre précédent fait l'objet de prescriptions.

4.3.1 - Dressage

L'Eurocode 2 Partie 1-1 précise explicitement en 3.2.1 (2) que « les exigences relatives aux propriétés des aciers de béton armé visent le matériau en place dans le béton durci ». Cette prescription remplace donc celle, équivalente, de l'article 4.3 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003). Elle signifie en particulier que le dressage ne doit pas altérer les caractéristiques spécifiées de l'acier. Si le dressage n'est pas effectué correctement, deux de ces caractéristiques peuvent être affectées :

- la hauteur des reliefs peut se trouver diminuée par écrasement ou abrasion au passage dans les galets ou les cadres tournants ;
- la ductilité peut être diminuée car le « chicanage » entraîne un écrouissage de l'acier susceptible de provoquer une réduction de l'allongement sous charge maximale A_{gt} et (ou) du rapport R_m/Re .

Le dressage est donc une opération qui nécessite attention et compétence de la part des armaturiers.

4.3.2 - Coupe

En matière de coupe, la caractéristique à respecter est la longueur des barres qui, en l'absence d'autres prescriptions, fait l'objet de tolérances dimensionnelles dans la norme NF A 35-027 (janvier 2003). Les tolérances sont différentes selon que les barres sont utilisées en recouvrement ou non. Le bureau d'étude doit donc préciser s'il s'agit ou non de barres en recouvrement. Cette indication peut apparaître sur les plans, mais elle doit aussi figurer sur les listes d'armatures qui sont parfois le seul document communiqué à l'armaturier.

Tableau n° 6: tolérances sur les dimensions des armatures coupées à longueur selon la norme NFA 35-027		
Longueur de l'élément <i>L</i> (en m)	Utilisation sans recouvrement d'armatures (en mm)	Utilisation avec recouvrement d'armatures (en mm)
$L \leq 2$	- 20 0	0 + 20
$2 < L \leq 4$	- 40 0	0 + 40
$4 < L$	- 50 0	0 + 50

4.3.3 - Façonnage

■ 4.3.3.1 - Diamètres de cintrage

Les valeurs minimales des diamètres intérieurs de cintrage doivent permettre de satisfaire à deux exigences différentes :

- **ne pas endommager l'armature elle-même lors du cintrage ;**
- **ne pas endommager le béton lors de la mise en charge de l'armature.**

La première condition est liée uniquement aux caractéristiques mécaniques de l'acier et en particulier à sa ductilité. La seconde a pour but de limiter les contraintes qui apparaissent dans le béton au contact d'une armature cintrée, sollicitée en traction, en particulier à l'intérieur de la courbure. Elle nécessite donc une vérification par le calcul. Dans l'ensemble réglementaire en vigueur à fin 2004 ces exigences se trouvent dans deux textes différents.

Le premier est le tableau 1 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003). Ce tableau reprend les prescriptions qui, jusqu'à 1990, étaient répétées dans chaque « fiche d'homologation » des aciers à haute adhérence. Ces fiches ont été ensuite remplacées par les certificats NF-AFCAB, (voir 4.4) qui ne comportent plus ces exigences.

Tableau n° 7: diamètres intérieurs de cintrage minimaux des aciers à haute adhérence selon la norme NF A 35-027													
Diamètre nominal de l'acier	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20	25	32	40
Cadres, étriers, épingles ou assimilés, y compris leur ancrage d'extrémité	20	25	30	30	40	40	50	70	100	150	200	sans objet	
Ancrages	50	70	70	70	100	100	100	150	150	200	250	300	400
Coudes	sans objet	100	100	100	150	150	200	200	250	300	400	500	500

Les diamètres prescrits sont très différents suivant la fonction de l'armature (cadres, étriers, épingles ou ancrages, ou enfin coudes). Il aurait donc été très souhaitable que le choix du mandrin ne prête pas à ambiguïté. Pourtant, les trois cas envisagés ne sont pas clairement définis, mais simplement illustrés par des croquis dont le dernier au moins, concernant les coudes, n'est pas très explicite.

Le chapitre 5 sera consacré à la nécessité pour les bureaux d'études de donner toutes les précisions nécessaires aux armaturiers pour qu'ils exécutent des ferrillages conformes à ceux qu'ils ont conçus. On y trouvera quelques exemples pour lesquels le choix convenable du diamètre de mandrin n'est pas évident.

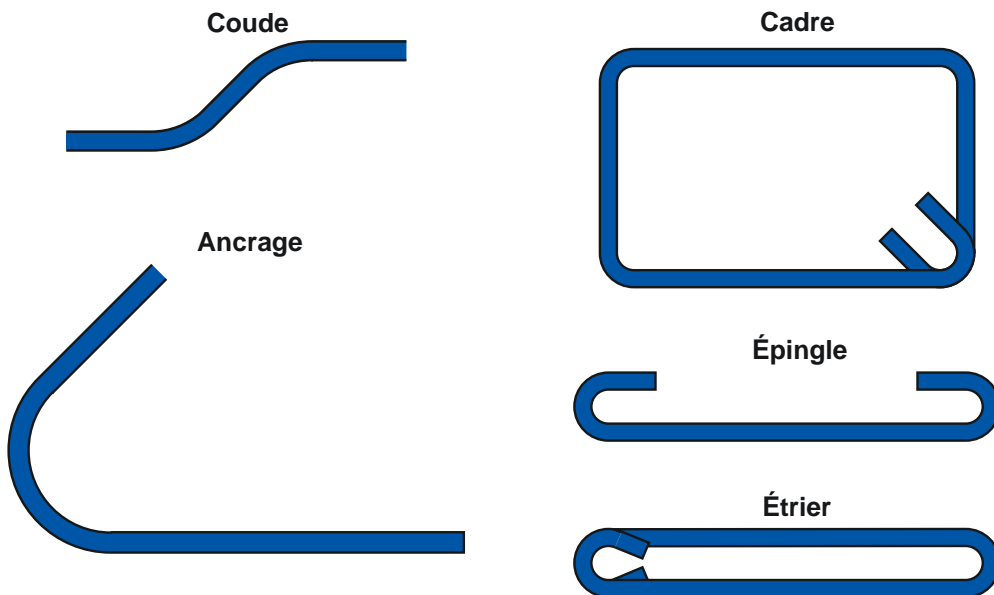


Figure n° 12: exemples de cadre, étrier, épingle, ancrage et coude selon la norme NF A 35-027 (janvier 2003).

La seconde prescription dite « condition de non écrasement du béton » se trouve dans les règles BAEL 91 au paragraphe A 6.1.252. Cependant :

- le paragraphe A.6.255 dispense de l'appliquer aux armatures transversales, cette exception est très importante ;
- pour les ancrages et les coudes, les diamètres de mandrins exigés par la norme sont très généralement supérieurs à ceux découlant de cette condition.

C'est pourquoi cette vérification était un peu tombée dans l'oubli, sans doute quelquefois à tort. En pratique, seules les valeurs figurant dans le tableau 7 sont prises en considération. Ce tableau est souvent reproduit sur les plans. Quand il ne l'est pas, il est considéré comme implicite.

Les règles de façonnage données par l'Eurocode 2 Partie 1-1 présentent plusieurs difficultés d'interprétation et d'application dont l'origine se trouve sans doute en grande partie dans les conditions d'élaboration de ce texte : discussions entre représentants de nombreux pays, rédaction d'un texte commun en anglais, puis traduction dans la langue de chaque pays. Les termes techniques utilisés dans une langue n'ont pas toujours un équivalent exact dans les autres. Il est alors difficile d'atteindre la même précision qu'un texte « national ».

L'Annexe N° 1 contient une analyse détaillée des articles relatifs au façonnage. Cette analyse conduit en résumé aux prescriptions suivantes même si certaines d'entre elles ne sont pas formulées explicitement dans l'Eurocode.

- a – Les diamètres de mandrins de façonnage doivent dans tous les cas, quels que soient la fonction de l'armature et l'angle de façonnage, être au moins égaux à :
 - 4 diamètres pour les armatures de diamètre au plus égal à 16 mm ;
 - 7 diamètres pour les armatures de diamètre supérieur à 16 mm ;
 - 5 diamètres en général pour les assemblages pliés après soudure ;
 - 20 diamètres pour les assemblages pliés après soudage avec soudure située sur l'extrados de la courbure, si le soudage n'est pas réalisé conformément à l'EN ISO 17660, Annexe B.
- b – Les diamètres de mandrins doivent en général faire l'objet d'une justification par le calcul vis-à-vis de la rupture du béton ;
- c – Cette justification n'est pas nécessaire si les conditions ci-après sont remplies :
 - l'ancrage nécessaire de l'armature ne dépasse pas 5 diamètres au-delà de la partie courbe ;
 - le tracé de la partie courbe de l'armature n'est pas parallèle à une paroi proche ;
 - il existe à l'intérieur de cette partie courbe une barre de diamètre au moins égal à celui de l'armature.

- d – Il n'est également pas nécessaire d'effectuer cette vérification pour toutes les armatures d'effort tranchant et les autres armatures transversales.
- e – Comme indiqué au paragraphe 4.1, les prescriptions de la norme NF A 35-027 ne s'appliquent pas si elles sont contraires à l'Eurocode. Les diamètres de mandrin figurant dans son tableau 1 ne sont donc plus considérés comme réglementaires. En dehors des cas cités en « b » et « c » ci-dessus, le diamètre minimal de façonnage résulte d'une vérification par le calcul.

On peut craindre que, le calcul informatisé aidant, une infinité de diamètres de façonnage n'apparaisse sur les plans. Pour des raisons pratiques il est nécessaire de limiter le nombre de mandrins utilisés. Une liste de diamètres préférentiels devrait être établie, par exemple dans la nouvelle norme NF A 35-027.

Les règles d'exécution (nouveau Fascicule 65 A pour les ouvrages de génie civil et norme ENV 13670-1 pour les bâtiments) se réfèrent à l'Eurocode 2 Partie 1-1.

■ 4.3.3.2 - Redressage des armatures pliées

Le redressage des armatures pliées est un cas de façonnage très particulier car d'une part il s'exécute sur le chantier et d'autre part, il s'applique à une zone d'armature qui a précédemment subi un pliage. La norme NF P 18 201 (DTU 21) contient à son article 5.2.1 les prescriptions suivantes relatives au redressage après pliage :

- les aciers sont aptes au redressage après pliage (mention d'aptitude figurant sur le certificat NF AFCAB) ;
- un outillage spécifique est utilisé (ce qui exclut le simple tube) ;
- cette opération n'est effectuée qu'une seule fois ;
- la procédure de redressage permet d'obtenir un fonctionnement correct du béton armé ;
- il n'y a pas de soudure dans la zone de redressage.

Les deux premières de ces prescriptions sont reprises dans le Fascicule 65 A à son article 63.3.

La norme ENV 13670-1 exige également à son article 6.3 l'emploi d'un outillage spécifique et une procédure de dépliage approuvée. Le nouveau Fascicule 65 A reprend à son article 63.3 les prescriptions de sa précédente version.

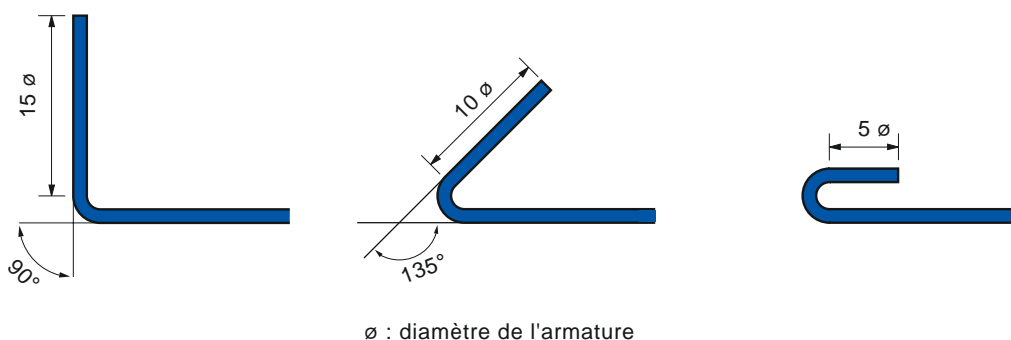
■ 4.3.3.3 - Longueur des parties droites.

La norme NF A 35-027 (janvier 2003) fixe les valeurs minimales des longueurs droites qui sont justifiées par des exigences pratiques d'exécution et de sécurité sur certaines machines de façonnage.

Ces règles restent applicables car elles ne sont pas contraires à l'Eurocode.

■ 4.3.3.4 - Ancrages des cadres et étriers

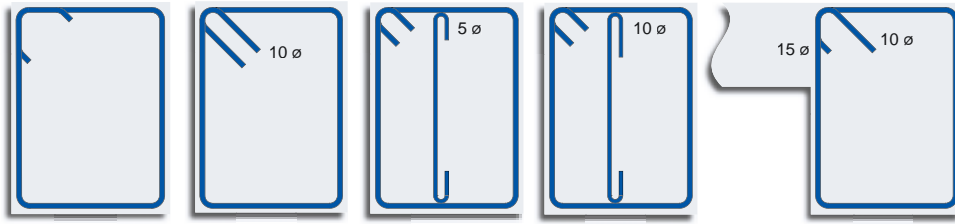
Dans les règles BAEL, les ancrages des cadres et étriers font l'objet de prescriptions particulières. Le paragraphe A.6.1,255 de ces règles indique trois solutions pour réaliser leurs ancrages d'extrémité avec une courbure suivant le rayon minimal (voir tableau 7). Ces ancrages représentés sur la figure n° 14 ne sont pas imposés, mais leur utilisation dispense de justification par le calcul. Leur emploi est de ce fait généralisé. Aucune des trois solutions n'est mentionnée comme préférentielle, elles sont donc strictement interchangeables dans la plupart des cas. La position de la « fermeture » des cadres et des étriers n'est pas non plus imposée. Par exemple dans une poutre fléchie, elle peut aussi bien se trouver dans la partie tendue que dans la zone comprimée. Dans le cas des constructions parasismiques les ancrages des cadres font l'objet de règles très particulières.



**Figure n° 13: armatures transversales.
Exemples d'ancrages conformes aux règles BAEL 91.**

Les règles PS 92 prescrivent à l'article 11.3.2 d'adopter des ancrages à 135°, au minimum « en parement », c'est-à-dire s'il y a risque de poussée au vide de la fermeture à 90°. Les fermetures à 90° ne sont pas interdites si elles se trouvent dans la masse du béton (tables de compression de poutres, dalles de planchers, murs en retour, etc.). Cet ancrage est également obligatoire dans les « zones critiques* » des pièces, zones dans lesquelles d'autres règles très spécifiques de calcul et de ferrailage sont par ailleurs imposées.

* Pour la définition des zones critiques, voir les règles PS 92.



Partie courante	non	oui	non	oui	oui
Zone critique	non	oui	non	oui	non

Remarque: les longueurs indiquées sont celles des parties droites après courbure

Figure n° 14: armatures transversales. Exemples selon les règles PS 92.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 prescrit en 8.5 (2) les dispositions applicables aux ancrages des armatures transversales (voir annexe N° 1).

La figure N° 15 montre les ancrages des cadres préconisés par l'Eurocode 2 Partie 1-1 et met en évidence les changements qui en résultent par rapport aux règles BAEL 91.

Angle de pliage	Prescriptions des règles BAEL 91	Prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-1
90°		
135°		
150°		
180°		

Figure n° 15: armatures transversales. Comparaison d'ancrages conformes aux règles BAEL 91 et à l'Eurocode 2 Partie 1-1.

Par rapport aux règles BAEL 91, l'Eurocode 2 permet donc de diminuer les longueurs droites après courbure pour les ancrages à 90° et pour les ancrages pliés à 150° et plus. En revanche, il ne modifie pas l'ancrage à 135°.

La figure n° 16 montre les combinaisons qui seront utilisées en pratique.

La fermeture avec deux crochets pliés à plus de 135° ne permet pas la mise en place d'une armature longitudinale dans l'angle. La fermeture avec deux coudes à 90°, avec une longueur droite après courbure de 10 diamètres, devrait se développer en France comme c'est déjà le cas dans la plupart des autres pays. Ce serait très souhaitable car cette disposition facilite l'exécution. Le double crochet à 135°, avec une longueur droite après courbure de 10 diamètres, comme prévu par les règles BAEL devrait rester aussi utilisé par habitude malgré les inconvénients pratiques qu'il présente.

- Pour les étriers l'ancrage à 150° suivi d'une longueur droite de 5 diamètres devrait remplacer le crochet à 180° actuellement utilisé.
- Pour les constructions devant résister aux séismes, l'Eurocode 8 prescrit d'utiliser des ancrages par crochet à 135° suivis d'une longueur droite de 10 diamètres pour les cadres « de confinement * ». Cette prescription est équivalente à celle des règles PS 92.

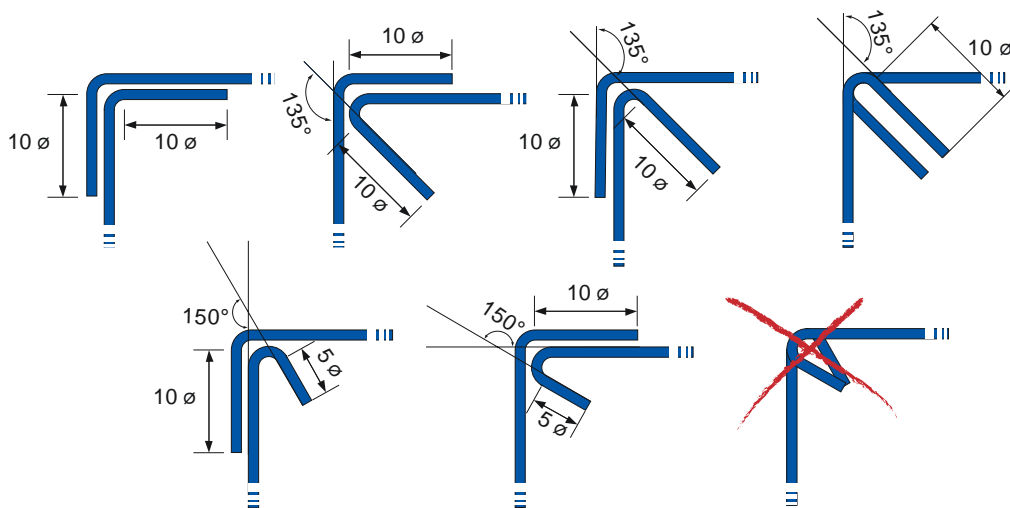
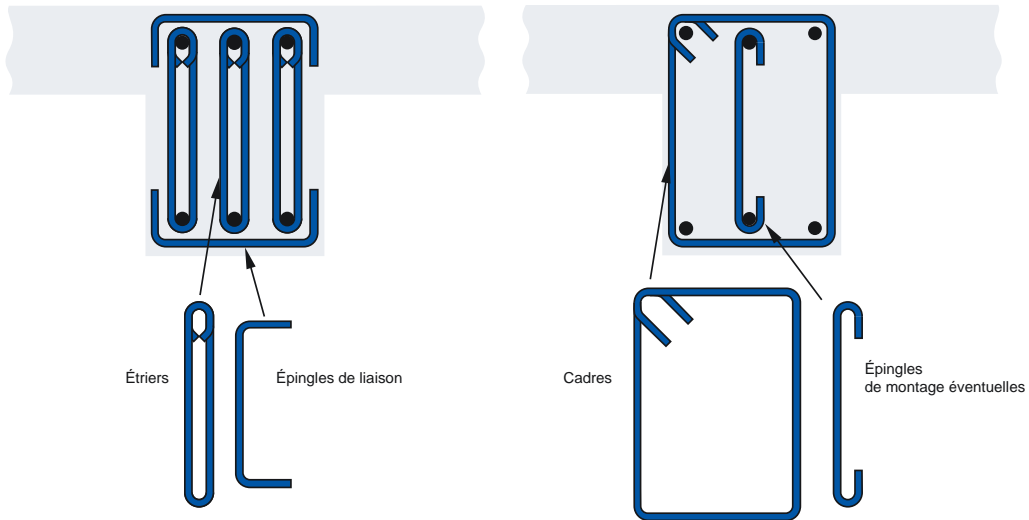


Figure n°16: armatures transversales. Exemples de combinaisons d'ancrages conformes à l'Eurocode 2 Partie 1-1.

■ 4.3.3.5 - Tracé général des armatures d'effort tranchant

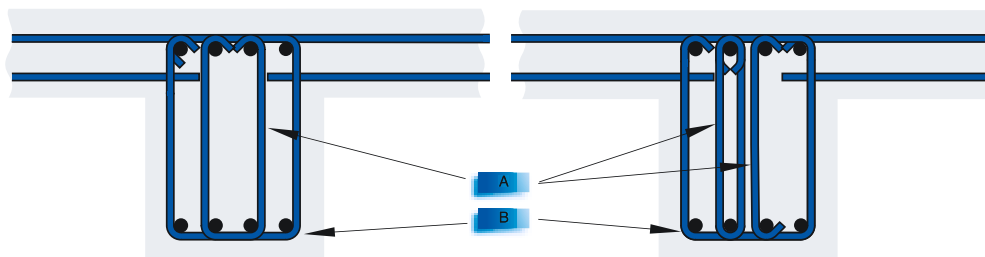
Le tracé, des cadres et des étriers fait aussi l'objet du paragraphe B.6.7, 1 des règles BAEL pour les poutres de bâtiments courants. Cet article prescrit que les cadres doivent suivre au plus près le contour des pièces. Il autorise aussi des files séparées d'étriers à condition de les relier par des épingles de liaison. Il n'impose pas non plus que toutes les files d'aciers longitudinaux comportent des épingles ou étriers.

* Pour la définition des cadres « de confinement », voir l'Eurocode 8



**Figure n° 17: armatures transversales de poutres fléchies.
Exemples de dispositions conformes aux règles BAEL 91.**

L'Eurocode 2 Partie 1-1 traite ce sujet en 9.2.2. Il confirme la possibilité d'utiliser en armatures d'effort tranchant différentes formes de cadres ouverts ou fermés, d'étriers, etc.



- A** Cadres, étriers et étriers intérieurs
- B** Cadre extérieur

Les armatures d'effort tranchant peuvent être composées d'une combinaison de :

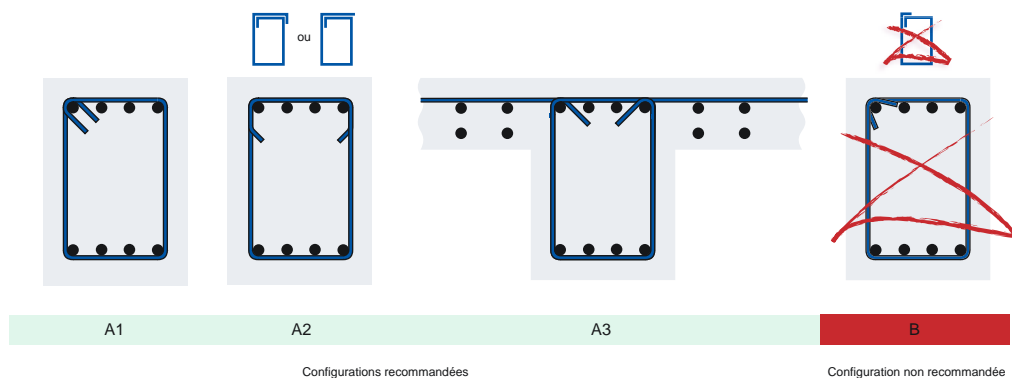
- cadres, étriers ou épingles entourant les armatures longitudinales tendues et la zone comprimée ;
- barres relevées ;
- cadres ouverts, échelles, épingles, etc., façonnés sans entourer les armatures longitudinales mais correctement ancrés dans les zones comprimées et tendues.

**Figure n° 18: armatures transversales de poutres fléchies.
Exemples de dispositions conformes à l'Eurocode 2 Partie 1-1.**

■ 4.3.3.6 - Tracé des armatures transversales de torsion

Le paragraphe A.5.4,4 des règles BAEL indique simplement que ces armatures doivent être placées aussi près que possible des parois en respectant les règles d'enrobage.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 prescrit en 9.2.3 que les cadres de pièces soumises à la torsion soient fermés et ancrés au moyen de recouvrements ou de crochets.



**Figure n° 19: armatures transversales de torsion.
Configurations recommandées par l'Eurocode 2 Partie 1-1.**

■ 4.3.3.7 - *Tracé des armatures transversales des poteaux*

En A.8.1, les règles BAEL demandent que ces armatures assurent le maintien de toutes les armatures longitudinales de diamètre supérieur à 20 mm vis-à-vis d'un mouvement vers l'extérieur de la section. Elles ne doivent pas comporter d'angle rentrant ni de recouvrement parallèle à la paroi.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 prescrit en 9.5.3 de maintenir les barres verticales placées dans les angles et celles placées à moins de 150 mm d'une barre tenue.

■ 4.3.3.8 - *Armatures façonnées proches des parements Poussée au vide*

Les armatures proches des parements risquent, lors de leur mise en charge, de générer des poussées susceptibles de faire éclater le béton d'enrobage. L'article A.7.4 des règles BAEL traite ce sujet qui concerne essentiellement les bureaux d'études. Les armaturiers doivent aussi s'en préoccuper dans les cas suivants :

- adjonction de barres de montage ;
- proposition de modification de ferrailage pour des raisons de commodité d'exécution.

La figure n° 20 représente schématiquement à titre d'exemple un ferrailage de console comportant deux lits de barres de façonnages identiques. Leur superposition nécessite un décalage inacceptable du lit inférieur. Ceci peut inciter l'armaturier à modifier le lit supérieur en augmentant son rayon de cintrage et en réduisant de 135° à 90° l'angle de pliage. Il peut en résulter une poussée au vide.

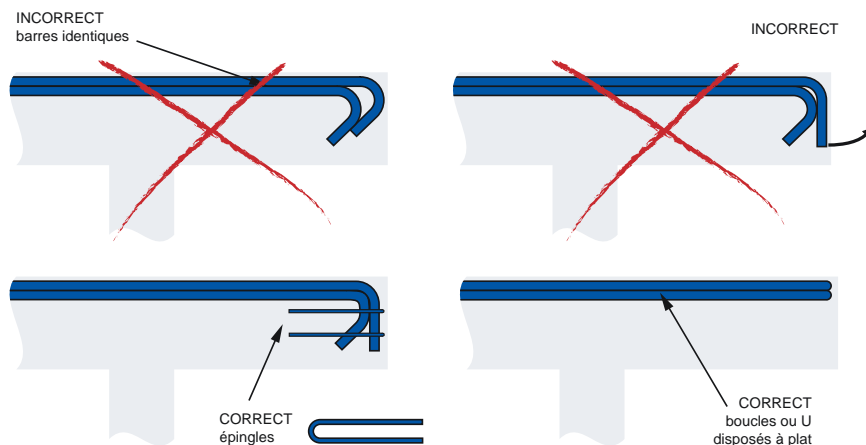


Figure n° 20: exemple de poussée au vide et solution alternative.

Il existe d'autres façons tout à fait correctes de résoudre ce problème tel que la mise en place d'épingles complémentaires, ou le remplacement des crosses par des boucles à plat.

■ 4.3.3.9 - Conditions générales de façonnage

L'article 5.2 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003) interdit de façonner à une température inférieure à -5 °C , et exige des précautions entre -5 °C et $+5\text{ °C}$, telles qu'une réduction de la vitesse de cintrage. Dans tous les cas, le chauffage des aciers est interdit.

L'article 62 du fascicule 65A (août 2000) contient des prescriptions identiques. De plus, ce même article n'autorise le façonnage des armatures dans les coffrages que pour la fermeture de cadres en acier lisse de diamètre au plus égal à 12 mm ou en acier à haute adhérence de diamètre au plus égal à 8 mm. En pratique le cintrage des armatures en place est souvent adopté dans les ponts-cadres et les portiques. Le guide de conception du SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes du Ministère de l'Équipement) l'admet explicitement (voir l'exemple n° 3 du paragraphe 5.3).

Ces ponts cadres ou portiques comportent en général des armatures coudées assurant l'encastrement de la dalle dans les pénétrations. Si ces barres sont livrées sur le chantier façonnées suivant leur forme définitive, la mise en place du coffrage et

du ferrailage de la traverse devient très difficile, et parfois impossible. Ces armatures sont alors livrées droites et façonnées sur place lorsque la traverse est coffrée et ferrillée. Les entreprises de pose d'armatures utilisent pour cette opération des cintreuses portatives. L'exigence essentielle est le respect des diamètres de mandrins de cintrage prévus.

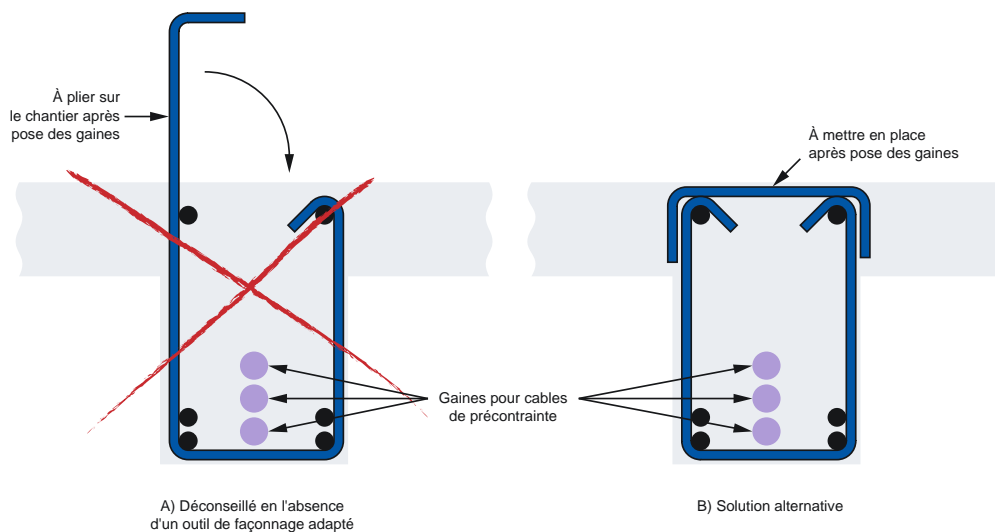


Figure 21 : exemple de façonnage d'armatures dans le coffrage, cadres à fermer sur le chantier.

C'est d'ailleurs plutôt pour la fermeture des cadres sur chantier (figure n°21A) que le risque de non-conformité est important, car il n'existe pas, à notre connaissance, de cintreuse portable permettant un façonnage correct dans cette configuration. Pour faciliter la mise en place des armatures longitudinales grâce à des cadres ouverts, il est préférable de prévoir des cadres en deux parties comme le montre la figure n°21B.

■ 4.3.3.10 - Tolérances de façonnage

Les tolérances de façonnage sont fixées par les articles 4.6.3 et 4.6.4 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003) que l'armaturier doit respecter et qui sont rappelées sur la figure n° 22.

Cette norme fixe aussi des tolérances sur les angles de façonnage des ancrages (figure N° 23).

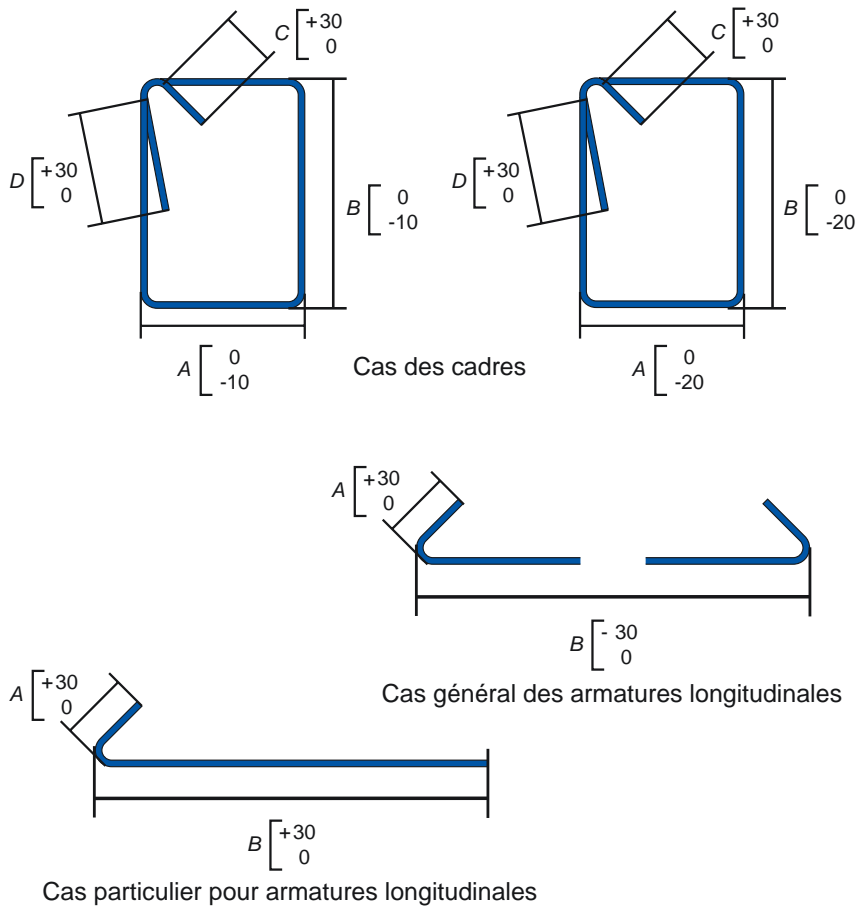


Figure 22: tolérances sur les dimensions des armatures façonnées selon la norme NF A 35-027 (janvier 2003).

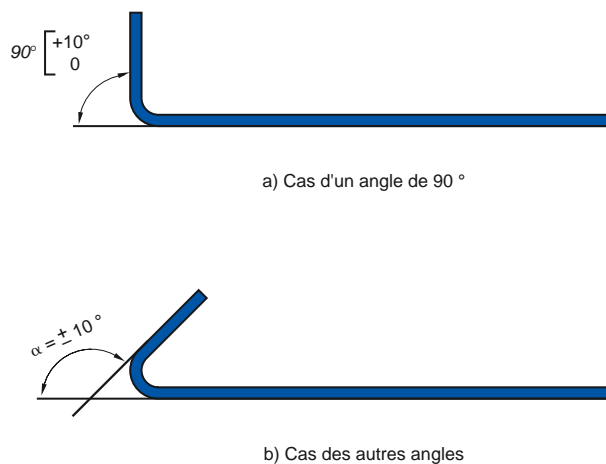


Figure 23: tolérances sur les angles des ancrages par courbure selon la norme NF A 35-027 (janvier 2003).

Nota

Cette norme n'est pas cohérente avec la norme européenne NF EN ISO 4066 qui définit les formes d'armatures par des cotes et non par des angles. Cette disposition semble cependant utile, car l'emploi des angles, bien que contraire à la norme, reste courant, et sans doute plus pratique.

Pour les diamètres de cintrage, les valeurs spécifiées (voir 4.3.3.1 ci-dessus), sont des valeurs minimales. Aucun écart en moins n'est donc accepté.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 concerne le calcul et non l'exécution. Il ne contient donc pas de prescription pour les tolérances de façonnage. Les valeurs fixées par la norme NF A 35-027 de janvier 2003 (ou sa nouvelle version) restent donc applicables.

4.3.4 - Assemblage

■ 4.3.4.1 - Rigidité

Quel que soit le mode d'assemblage, l'article 4.7 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003) et le paragraphe 63.1.1 du Fascicule 65 (août 2000) demandent qu'il confère aux cages d'armatures une rigidité suffisante pour supporter le transport, la pose en coffrage et le bétonnage. Ceci impose en général un nombre de points d'attache ou de soudure entre armatures coupées-façonnées au moins égal à 50 % du nombre de points d'intersection.

■ 4.3.4.2 - Assemblage par soudure

Le paragraphe 4.4 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003) détaille les prescriptions applicables aux assemblages soudés suivant la fonction qu'ils assurent. Lorsque les soudures doivent transmettre des efforts, des règles particulières doivent être respectées et les opérateurs réalisant les soudures doivent être qualifiés. Nous ne traiterons pas ce cas, qui est tout à fait exceptionnel.

Dans le cas courant, les soudures ont uniquement une fonction de montage. Il faut néanmoins s'assurer que les armatures ne sont pas affectées par le soudage (réduction de section, perte d'allongement sous force maximale, etc.). C'est pourquoi la norme impose en particulier que le petit diamètre à assembler soit supérieur à 40 % du gros diamètre dans le cas de soudure par résistance. Le couple 6-16 mm est cependant admis.

La spécification de portée très générale de l'Eurocode 2 Partie 1-1 a été citée à propos du dressage: « Les exigences relatives aux propriétés des aciers de béton armé visent le matériau en place dans le béton durci ». Cette exigence inclut en particulier l'absence d'altération des caractéristiques des aciers lors des opérations de soudage.

■ 4.3.4.3 - Tolérances dimensionnelles sur les armatures assemblées

Les tolérances dimensionnelles sur les armatures assemblées sont aussi fixées par la norme NF A 35-027 (janvier 2003), aussi bien pour les positions respectives des armatures, que pour les dimensions d'ensemble.

Caractéristiques	Type d'armature	Cotes de la figure	Écart en moins (en mm)	Écart en plus (en mm)	
Position relative élémentaire	Cadre, étriers, épingles	C	- 10	+ 10	
	Éléments d'armatures autres que cadres, étriers et épingles	A	- 30	+ 30	
Position relative cumulée	Cadres, étriers et épingles	4xC, B	- 20	+ 20	
Largeur / Hauteur	Dimension nominale < 150 mm	H	- 10	0	
	Dimension nominale ≥ 150 mm	H	- 20	0	
	Armatures dont la longueur est conditionnée par des barres coupées	$L \leq 2 \text{ m}$	L	- 20	+ 10
		$2 \text{ m} < L \leq 4 \text{ m}$	L	- 40	+ 10
		$4 \text{ m} < L$	L	- 50	+ 10
	Armatures dont la longueur est conditionnée par des barres façonnées	L	- 30	+ 10	
	Armatures utilisées par recouvrement ou coupe à longueur (par exemple chaînages, semelles filantes)	L	- 50	+ 50	

Figure n° 24: tolérances sur les caractéristiques dimensionnelles des armatures assemblées selon la norme NF A 35 027.

Bien entendu, dans certains cas très particuliers, des tolérances plus sévères peuvent être souhaitées. Le maître d'œuvre doit alors s'assurer qu'elles sont réalisables, et les préciser explicitement dans les pièces écrites des marchés. Des dispositions particulières de production pourront alors être adoptées (gabarits, contrôle spécifique, etc.).

4.3.5 - Pose en coffrage et position finale des armatures

Si la pose est réalisée à partir d'armatures coupées façonnées, toutes les règles que nous avons énoncées au sujet du montage doivent évidemment être respectées. Le travail sur site plutôt qu'en atelier nécessite une compétence et une attention particulières.

Dans tous les cas, les armatures ne peuvent être convenablement mises en place que si elles ont été conçues et fabriquées de façon satisfaisante. La position des armatures après bétonnage implique aussi les entrepreneurs chargés des coffrages et du bétonnage.

Les normes et autres textes réglementaires formulent des prescriptions qui portent d'une part sur les enrobages et d'autre part sur les positions des armatures non concernées par l'enrobage.

■ 4.3.5.1 - Enrobage

L'enrobage est défini comme la distance entre l'armature (épingles, étriers et cadres compris, ainsi que les armatures de peau, le cas échéant) la plus proche de la surface du béton et cette dernière. L'enrobage des armatures doit être suffisant pour garantir :

- la protection de l'acier contre la corrosion (durabilité) ;
- la bonne transmission des efforts d'adhérence ;
- une résistance au feu convenable.

Dans des conditions normales, les armatures enrobées dans un béton compact et non fissuré sont protégées naturellement par un phénomène de passivation qui provoque la création à la surface de l'acier d'une pellicule protectrice. Cette pellicule est formée par l'action de la chaux libérée par les silicates de calcium contenus dans le ciment sur l'oxyde de fer. La présence de chaux maintient la basicité du milieu entourant les armatures. Les armatures sont protégées tant que le pH de ce milieu est compris entre 9 et 13,5. Deux principaux phénomènes peuvent dans certaines conditions détruire cette protection :

- la carbonatation du béton d'enrobage par absorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère ;
- la pénétration des ions chlorures jusqu'aux armatures.

La carbonatation n'est pas nuisible au béton, mais elle entraîne une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu entourant les armatures qui

peuvent alors s'oxyder. La progression de la carbonatation se fait depuis l'extérieur de l'ouvrage en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. La vitesse du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone, de la porosité du béton et de l'humidité relative de l'air.

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements tels que la présence de sels de déverglaçage et surtout les proximités de bords de mer. Les ions chlorure peuvent migrer depuis la paroi exposée vers les armatures et « dépassiver » l'acier. Ils pénètrent dans le béton par capillarité avec une vitesse fonction de la porosité du béton. Lorsque la corrosion a débuté, elle produit un gonflement des armatures qui entraîne un éclatement du béton d'enrobage. La protection de l'acier disparaît et le phénomène s'accélère.

La durabilité du béton armé nécessite donc que les armatures soient convenablement protégées, ce qui impose en particulier que la distance entre les armatures et le parement exposé le plus proche (enrobage) soit suffisante. L'armature doit donc :

- être fabriquée de façon à permettre de respecter ces distances ;
 - être posée en coffrage en les respectant effectivement, sans écart en moins.
- Dans les règles BAEL 91, l'article A.7, 1 précise les enrobages minimaux suivant les conditions d'exposition.

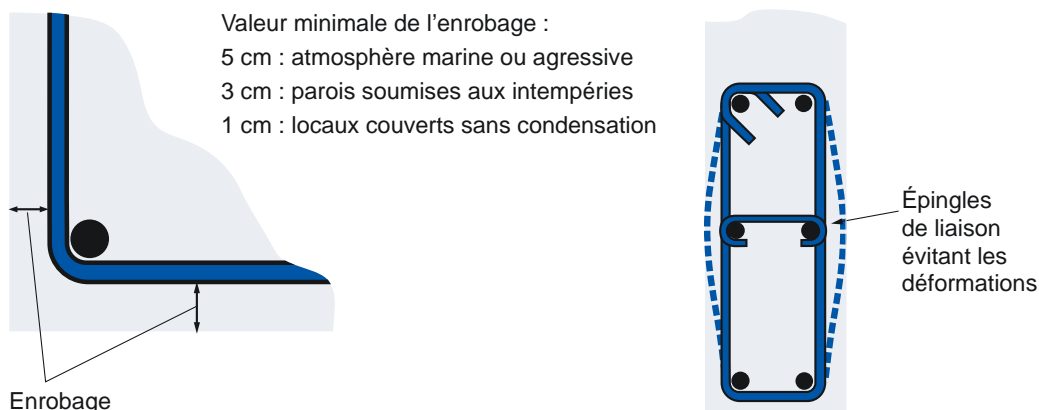


Figure n° 25: enrobage minimal selon les règles BAEL 91.

Si les conditions d'exposition sont différentes pour les diverses faces d'une pièce (poutres de façade par exemple), les enrobages peuvent avoir des valeurs différentes. Les enrobages minimaux doivent être respectés non seulement par les armatures, mais aussi par les pièces ou accessoires sujets à la corrosion : manchons, ligatures, cales ou boîtes d'attentes métalliques, etc. Les pièces de grandes dimensions risquent de se déformer au cours des transports et des manutentions. C'est pourquoi l'article A.7.1 des règles BAEL précise dans sa partie commentaire qu'il convient d'utiliser des diamètres plus importants et de prévoir des dispositifs de maintien convenables (cales ou éléments de montage). Le Fascicule 65 A (version août 2000) contient des prescriptions analogues au paragraphe 63.1, et il en est de même dans le projet de nouvelle version.

Compte tenu de l'importance du respect des enrobages pour la durabilité des structures en béton armé, les tolérances sur l'enrobage font l'objet de prescriptions particulières :

- la norme NF A 35-027 ne traite pas de l'enrobage, car celui-ci ne dépend pas de la seule armature ; en revanche, nous avons vu plus haut qu'elle ne tolère aucune marge « en plus » sur les dimensions des armatures coupées, façonnées ou assemblées quand elles mettent en jeu l'enrobage ;
- les règles BAEL à leur paragraphe A.7.1, de même que le fascicule 65 A, dans l'article 64, reproduit au paragraphe ci-après, n'acceptent aucune tolérance en moins sur les enrobages ;
- la norme NF P 18-201 (DTU 21) est en cohérence avec l'Eurocode 2. Elle définit l'enrobage nominal qui doit figurer sur les plans à partir d'un enrobage minimal majoré d'une marge pour tolérances d'exécution dont la valeur est fixée à 10 mm.

C'est l'enrobage nominal qui constitue la référence pour la fabrication et pour la pose des armatures.

EXTRAIT DU FASCICULE 65 A (août 2000)

Article 64 : tolérances sur la position des armatures après bétonnage*

Sauf prescriptions particulières du marché pour tenir compte de risques tels que l'incendie ou les milieux agressifs, les tolérances suivantes sont acceptées :

- les tolérances en moins sur l'enrobage** minimal sont nulles ;
- pour une pièce de hauteur (ou d'épaisseur) h , dans la direction ou l'écart de l'armature diminue la résistance, la tolérance est de 5 mm pour $h < 250$ mm et d' $h/50$ lorsque h est compris entre 250 mm et 1000 mm ;
- pour les armatures parallèles dont l'espacement est au plus égal à 100 mm, la tolérance sur cet espacement est fixée à 10 mm ;
- dans les autres cas, l'écart toléré est de 20 mm dans toutes les directions.

* Voir le chapitre 10 du Fascicule 65A.

** Il est rappelé que l'enrobage est défini comme distance de l'axe d'une armature à la paroi la plus voisine diminuée du rayon nominal de cette armature, après enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton (par exemple dans le cas du bouchardage).

Vis-à-vis de la résistance au feu, le texte de référence dans la réglementation française à fin 2004, est le DTU « Règles de calcul : méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton » de décembre 1993. Le calcul fait intervenir la distance de l'axe de chaque armature au parement du béton exposé au feu, baptisé « distance utile ». La distance utile d'une armature est donc égale à son enrobage majoré de la moitié de son diamètre.

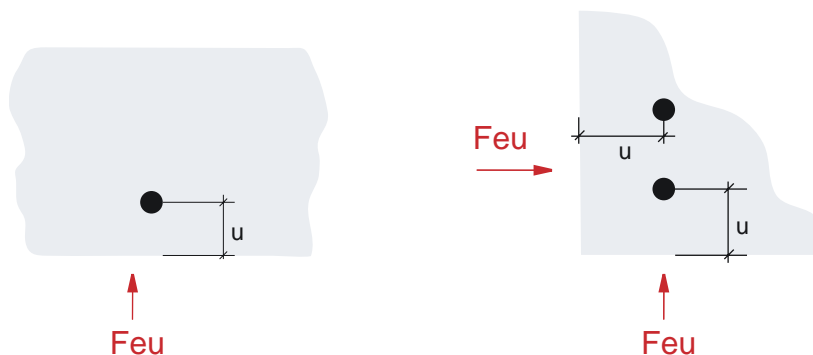
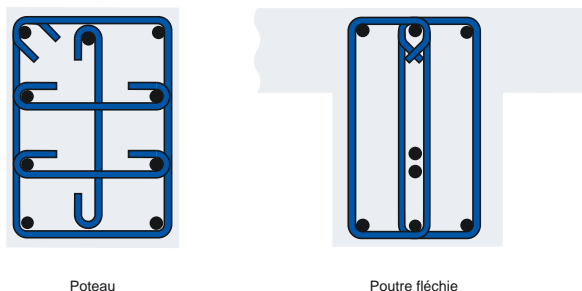


Figure 26: distance utile selon les règles: méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures.

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 spécifique 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.

Figure n° 27: exemples de ferrillages étudiés en vue de la résistance au feu.

La position du ferrailage est primordiale pour la résistance au feu. Elle doit donc être précisée au moyen de plans de détail. Elle doit être respectée avec une tolérance de plus ou moins 10 %. Un calage efficace est indispensable.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 consacre à l'enrobage la totalité de sa section 4.

La valeur minimale d'enrobage préconisée dépend de plusieurs paramètres qui sont pris en compte de façon extrêmement détaillée :

- la durée d'utilisation du projet qui détermine sa classe structurale ;
- les conditions d'environnement qui détermine sa classe d'exposition ;
- l'utilisation d'acier inoxydable ;
- la présence de protections complémentaires ;

- la régularité du parement ;
- les risques d'abrasion du béton ;
- la composition du béton ;
- la régularité de la surface contre laquelle le béton est coulé ;
- les conditions de surveillance de l'exécution.

On trouvera en Annexe N° 2 le détail du processus de détermination de l'enrobage tel qu'il résulte de l'Eurocode 2 Partie 1-1, après prise en compte des précisions et compléments formulés dans son Annexe Française.

Une innovation importante réside dans la prise en compte des tolérances d'exécution. Pour prendre en compte les tolérances d'exécution, l'enrobage minimal doit être majoré d'une « marge de sécurité ». On obtient ainsi l'enrobage « nominal ». La marge recommandée est de 10 mm. Elle peut être diminuée jusqu'à 5 mm lorsqu'un système d'assurance qualité incluant des mesures d'enrobage des armatures est mis en place. Les contrôles imposés par les Règles de certification AFCAB « Pose » répondent à cette exigence.

C'est l'enrobage nominal qui doit être utilisé dans les calculs et qui doit être indiqué sur les plans. Il constitue la référence pour la fabrication et pour la pose des armatures.

La grande variété des cas prévus par l'Eurocode 2 Partie 1-1 peut inciter les bureaux d'études, dans un souci d'optimisation des structures, à prévoir des enrobages différents pour les diverses pièces d'un même ouvrage ou bâtiment. Les armaturiers doivent être vigilants sur ce point. Comme dans bien d'autres cas, il sera important d'éviter les confusions entre les anciens et nouveaux règlements.

L'enrobage nominal peut donc varier de 10 mm à 65 mm suivant les paramètres retenus. À titre d'exemple, la classe structurale recommandée pour les bâtiments étant la classe S4, en utilisant un béton adapté à la classe d'exposition, on obtient les valeurs suivantes d'enrobage nominal :

- 25 mm (20 mm pour les dalles), pour un béton de structures couvertes, closes ou non, à l'abri de la pluie sans condensation (classe XC3) ;
- 30 mm pour un béton extérieur exposé à la pluie et pour les ponts (classe XC4) ;
- 35 mm pour les éléments de structures exposés aux sels marins et situés de 500 m à 5 km de la côte sauf topologie particulière (classe XS1) ;
- 45 mm pour les structures situées de 0 à 500 m des côtes, les ponts exposés à des projections contenant des chlorures ou les dalles de parkings.

Le projet de nouveau fascicule 65A ainsi que le projet de norme ENV 13670-1 reprennent les prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-1. Le nouvel ensemble réglementaire concernant l'enrobage est donc totalement cohérent à la fois pour les bâtiments et pour le génie civil.

EXTRAIT DU PROJET DE FASCICULE 65 A (au 27/10/2004)

73.1.2 tolérances sur la position des armatures*

Sauf prescriptions particulières du marché pour tenir compte de risques tels que l'incendie ou les milieux agressifs, les tolérances suivantes sont à respecter :

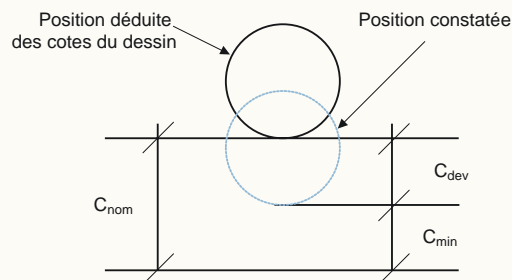
- en aucun cas, l'enrobage ne peut être inférieur à C_{\min} ;
- la tolérance $\Delta_{(\text{plus})}$ dans la direction h (hauteur ou épaisseur de l'élément), où l'écart de l'armature diminue la résistance, est prise égale à :
 - pour $h \leq 150$ mm $\Delta_{(\text{plus})} = 10$ mm
 - pour $h = 400$ mm $\Delta_{(\text{plus})} = 15$ mm
 - pour $h \geq 2500$ mm $\Delta_{(\text{plus})} = 20$ mm

avec une interpolation linéaire pour les valeurs intermédiaires.

- pour les armatures parallèles dont l'espacement est au plus égal à 100 mm, la tolérance sur cet espacement est fixée à 10 mm ;
- dans les autres cas, l'écart toléré est de 20 mm dans toutes les directions.

* Concernant les enrobages, la norme EN 1992-1-1 section 4 fournit les définitions suivantes :

- C_{\min} est l'enrobage minimal ;
- ΔC_{dev} est la marge de calcul pour tolérances d'exécution ; elle est en général fixée à 10 mm. Si une valeur plus faible est retenue, elle est portée sur les dessins d'exécution ;
- $C_{\text{nom}} = C_{\min} + \Delta C_{\text{dev}}$ est l'enrobage nominal.



L'enrobage nominal est spécifié sur les dessins d'exécution ; il détermine la dimension des cales à utiliser. Il est rappelé que l'enrobage est défini comme la distance de l'axe d'une armature à la paroi la plus voisine diminuée du rayon nominal de cette armature, après enlèvements éventuels de matière postérieurs à la mise en place du béton (par exemple dans le cas du bouchardage).

Dans la nouvelle réglementation européenne, les prescriptions relatives au comportement du béton armé au feu se trouveront dans l'Eurocode 2 Partie 1-2. Pour ce qui concerne la disposition des armatures les principes devraient rester similaires à ceux des recommandations françaises applicables auparavant.

■ 4.3.5.2 - Maîtrise de la fissuration

Un enrobage convenable n'est pas la seule condition pour assurer la protection des armatures contre la corrosion. Il faut aussi limiter la fissuration du béton.

En ce qui concerne la conception du ferrailage, l'article A.4.5,323 des règles BAEL demande de prévoir le plus grand nombre de barres compatibles avec une mise

en place correcte du béton, afin de limiter la fissuration. Cette recommandation semble avoir été suivie parfois de façon abusive en privilégiant l'utilisation de barres de petits diamètres. En fait le même article demande d'éviter les petits diamètres au voisinage des parements et dans les pièces soumises aux intempéries. Les gros diamètres conviennent dans les sections de béton suffisamment épaisses, ce qui est en général le cas.

Pour limiter la fissuration, il faut surtout prévoir des armatures de section suffisante afin que leur contrainte ne dépasse pas les valeurs convenables en fonction des conditions d'exposition et de la destination de l'ouvrage.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 formule en 7.3.3 et 7.3.4 les prescriptions visant à maîtriser la fissuration. Elles sont plus précises que celles des règles BAEL et consistent à respecter, au choix, un diamètre maximal ou un espacement maximal des barres. Les valeurs limites dépendent de divers facteurs dont, en particulier, la contrainte de l'acier et la classe d'exposition de l'ouvrage.

■ 4.3.5.3 - Position des armatures non concernées par l'enrobage

Pour les marchés publics d'ouvrages de génie civil, les tolérances sur la position des armatures sont données par le fascicule 65 (août 2000) dans son article 64. Le projet de nouvelle version du fascicule 65A, en date du 27 octobre 2004 mentionne les prescriptions dans l'article 7.3.2.1 (reproduit au paragraphe 4.3.5.1).

■ 4.3.5.4 - Possibilité de bétonnage correct

Les conditions de bétonnage correct sont données par l'article A.7.2 des règles BAEL et représentées figure n° 28.

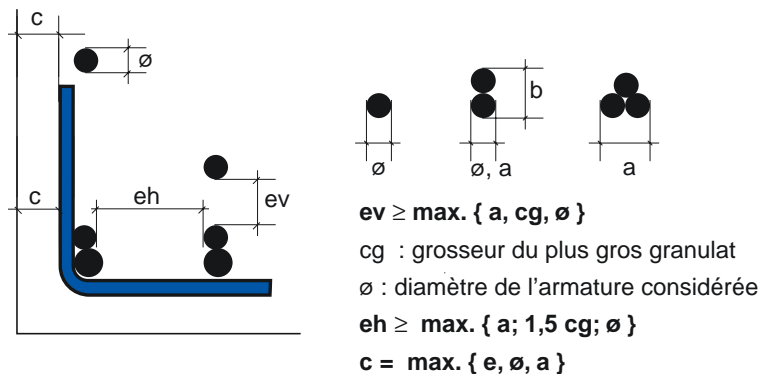


Figure n° 28: distances minimales des armatures aux coffrages et entre elles permettant un bétonnage correct selon les règles BAEL 91.

Les paquets de barres sont autorisés mais leur emploi est limité par des considérations relatives à l'adhérence. Lorsqu'ils sont utilisés, ils doivent être explicitement représentés sur les plans. Un commentaire de l'article A 7.2 indique : « il y a toujours intérêt à adopter des distances (des armatures entre elles et entre armatures et coffrage) supérieures aux valeurs minimales indiquées ».

Cette recommandation est mieux satisfaite si on réalise le ferrailage avec peu de barres de gros diamètre, mais il faut aussi respecter les prescriptions visant à maîtriser la fissuration citées au paragraphe 4.3.5.2. La solution se trouvera dans un compromis. Il faut aussi noter que :

- la condition d'enrobage fixée dans l'article A.7.2 peut être plus sévère que celle de l'article A.7.1 qui concerne la protection des armatures. Ce cas est cependant assez rare ;
- les articles A.7.2,6 à A.7.2,9 comportent des prescriptions complémentaires dont le but est d'éviter que les « mailles » et « entassements » formés par les armatures ne gênent le bétonnage. Si nécessaire, des « cheminées de bétonnage » doivent être prévues à l'initiative du bureau d'études ou de l'entreprise.

L'Eurocode 2 Partie 1-1 traite en 8.2 les exigences relatives à la possibilité de bétonnage correct. Ces prescriptions sont représentées sur la figure n° 29.

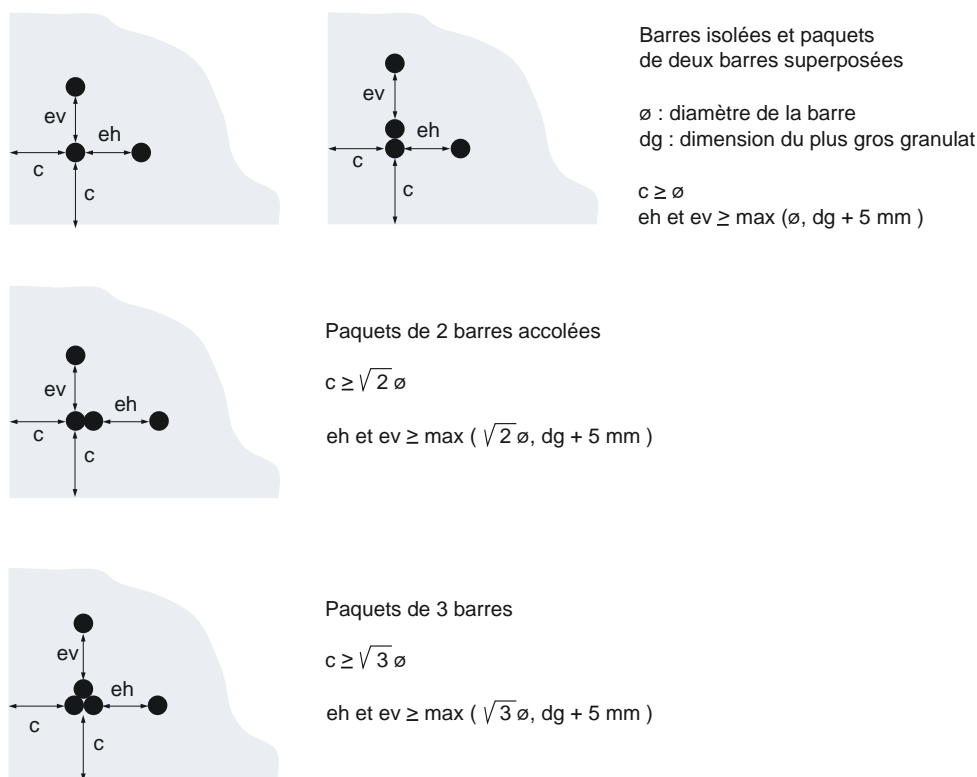


Figure n° 29: distances minimales des armatures aux coffrages, et entre elles permettant la transmission des forces d'adhérence et un bétonnage correct suivant l'Eurocode 2 partie 1.1.

Il est aussi exigé que « lorsque les barres sont placées en lits horizontaux distincts, il convient de superposer les barres de chaque lit en files verticales en ménageant entre ces files un espace suffisant pour permettre le passage des aiguilles vibrantes et assurer un bon compactage du béton ».

Cette condition semble difficile à respecter à la lettre, mais elle fixe l'objectif à atteindre dans le même esprit que les règles BAEL.

L'emploi de paquets de barres est soumis à des conditions analogues à celles des règles BAEL.

Ces problèmes ne sont pas toujours bien traités par les logiciels de dessin d'armatures. L'armaturier peut signaler les dispositions qui lui semblent anormales, mais il ne dispose pas de toutes les informations nécessaires, telles que la composition du béton (dimension maximale des granulats), les caractéristiques du béton à l'état frais (consistance) et les conditions de bétonnage.

4.3.6 - Armatures manchonnées

Chaque procédé de manchonnage d'armatures fait l'objet de consignes de mise en œuvre spécifiques, établies par le concepteur ou le fabricant. Leur validité est attestée par la certification AFCAB, et elles doivent être scrupuleusement respectées, aussi bien lors de la préparation des barres que lors de leur mise en place.

4.3.7 - Boîtes d'attentes

Malgré leur développement, ces produits ne font l'objet à ce jour d'aucune règle technique précise. Les procédés diffèrent par la forme et le matériau constitutif de la boîte et par la façon dont celle-ci peut être retirée.

Leur emploi doit être soumis à l'accord du maître d'œuvre qui prendra essentiellement en considération :

- la qualité de la surface de reprise obtenue ;
- la possibilité de redresser convenablement la partie cintrée des armatures.

Dans tous les cas on exigera que l'acier utilisé soit apte au redressage après pliage.

Ce chapitre a permis de présenter tous les paramètres qui conditionnent la conformité de l'armature. Cette analyse démontre la nécessité impérative du travail en commun entre le bureau d'études et l'armaturier en amont de l'exécution. C'est pourquoi la norme NF A 35-027 mentionne l'analyse des plans parmi les opérations de fabrication.

Si l'armaturier relève des anomalies ou rencontre des difficultés d'exécution, il ne doit en aucun cas prendre seul la décision de modifier l'armature prévue sur les plans. En revanche, il doit les signaler au bureau d'études en indiquant les solutions alternatives que son savoir faire lui permet de proposer.

4.4 Certifications gérées par l'AFCAB

Les certifications gérées par l'AFCAB couvrent l'ensemble du cycle des armatures depuis la production des aciers jusqu'à la pose des armatures en coffrage. On distingue quatre certifications.

4.4.1 - Certification NF – Aciers pour béton armé

La certification NF - Aciers pour béton armé, gérée par l'AFCAB, garantit que les produits certifiés :

- sont conformes à leur norme de référence : caractéristiques mécaniques, masse linéique, analyse chimique, caractéristiques géométriques, non fragilité, soudabilité, aptitude au redressage après pliage (optionnelle), résistance au cisaillement des soudures et dimensions des treillis soudés ;
- ont une origine identifiable et sont contrôlés.

Chaque acier certifié est identifiable par une marque de laminage spécifique à chaque producteur et par un étiquetage NF – AFCAB. Il fait l'objet d'un certificat délivré par l'AFCAB qui précise :

- sa dénomination ;
- l'usine productrice ;
- les caractéristiques certifiées ;
- la marque de laminage ;
- les conditions de validité.

La liste des certificats est consultable sur www.afcab.org

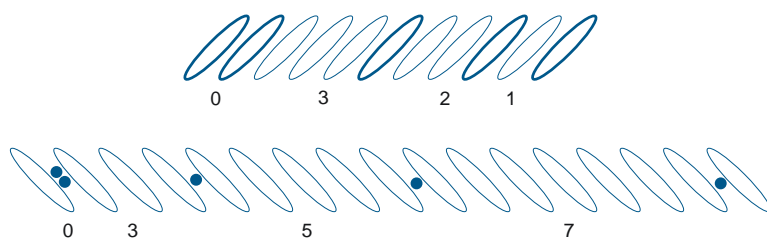


Figure n° 30: exemples de marques de laminage.

4.4.2 - Certification AFCAB – Dispositifs de rabouillage ou d’ancrage des armatures du béton

la certification AFCAB-Dispositifs de rabouillage ou d’ancrage des armatures du béton garantit que les produits certifiés :

- permettent de réaliser des liaisons respectant les critères de la norme NF A 35-020-1 ;
- sont fabriqués conformément à des plans et sont contrôlés ;
- font l’objet d’instructions de mise en œuvre appropriées.

4.4.3 - Certification NF – Armatures

la Certification NF - Armatures garantit que les produits certifiés :

- sont conformes à la norme NF A 35-027 (aciers de base conformes, non altération des aciers au cours de la fabrication, dimensions et angles conformes, conformité du manchonnage) ;
- sont conformes aux plans, catalogues ou cahiers des charges du client ;
- ont une origine identifiable et sont contrôlés.

Chaque fardeau ou paquet d’armatures comportent une étiquette sur laquelle sont présents :

- le logo de la marque NF ;
- la mention « NF A 35-027 » ;

- la portée du certificat (catégories et opérations couvertes, par exemple : Armatures sur plan coupées façonnées) ;
- le nom de l'usine et de la société titulaire du certificat ;
- le numéro de certificat
- pour les armatures sur plans, les indications spécifiées à l'article 9 de la norme NF A 35-027 (nom du client, nom du chantier, numéro du plan, référence de l'armature, etc.) ou pour les armatures sur catalogue, la référence du produit.

Dans le cadre de la certification NF-Armatures, l'AFCAB exige des essais de pliage et de traction pour vérifier les caractéristiques des armatures après soudage. L'AFCAB supervise aussi la qualification des soudeurs.

4.4.4 - Certification AFCAB – Pose des armatures du béton

Elle garantit que les aciers et les armatures posés par l'entreprise certifiée :

- sont conformes à leurs normes de référence ;
- sont posés en respectant les plans, les règles de béton armé, les règles de mise en place des accessoires (notamment les manchons) ;
- sont parachevés sans altération des aciers ;
- sont contrôlés après la pose.

Pour les ouvrages de génie civil faisant l'objet d'un marché public de travaux, le fascicule 65 A :

- impose d'utiliser des aciers et des dispositifs de raboutage certifiés ;
- conseille fortement de choisir un atelier d'armatures bénéficiant de la certification NF – Armatures. Dans ce cas, ces produits ayant été contrôlés dans le cadre de la certification, ils ne feront l'objet que d'une vérification d'identification et d'aspect ;
- impose dans le cas d'autres provenances, une réception des armatures par lots suivant les règles très contraignantes définies par la norme NF A 35-027 ;
- conseille fortement de recourir à des entreprises de pose bénéficiant de la certification AFCAB – Pose des armatures du béton ;
- impose aux maîtres d'œuvre, dans le cas contraire, une acceptation sur la base des critères du règlement de certification et du contrôle de la pose des armatures du béton de l'AFCAB.

Dans tous les cas, les garanties apportées par les certifications de l'AFCAB sont un gage de qualité pour les entreprises, les maîtres d'œuvre, et les donneurs d'ordre. Elles sont de ce fait souvent imposées par les cahiers des charges des marchés.