

L'ARMATURE DU BÉTON

De la conception  
à la mise en œuvre



L'ARMATURE DU BÉTON

# De la conception à la mise en œuvre

## *Contributions à l'ouvrage*

*Cet ouvrage, issu de la collaboration entre l'AFCAB (Association Française de Certification des Armatures du Béton) et CIMBÉTON (centre d'information sur le ciment et ses applications), a été rédigé par :*

*Jean DITRICHSTEIN      Ingénieur ECP*

*Ont également participé à la rédaction :*

<i>Michel FERRAN</i>	<i>APA</i>
<i>Patrick GUIRAUD</i>	<i>CIMBÉTON</i>
<i>Jean-François GUITONNEAU</i>	<i>PARSIDER</i>
<i>Louis-Jean HOLLEBECQ</i>	<i>AFCAB</i>
<i>Alain LE LIEVRE</i>	<i>ADETS</i>

*Contributions aux illustrations :*

*AGIBAT  
BARTEC  
BLB CONSTRUCTIONS  
FORNACE MANNA  
GERMAIN ARMATURES  
GROUPE FIMUREX  
PRESIDER  
SNAAM*

# Avant-propos

● En utilisant les certifications de l'AFCAB, le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre sont assurés que l'armature posée en coffrage remplit les conditions de validité du calcul de dimensionnement de l'ouvrage. L'AFCAB ne se préoccupe pas seulement de la conformité des aciers pour béton armé sortis d'usine. Elle se préoccupe également des transformations qu'ils subissent pour en faire des armatures coupées, façonnées, assemblées qui peuvent être posées en coffrage. Elle se préoccupe aussi des accessoires, comme les manchons de raccordement, et de la pose des armatures. Il est évident qu'un acier « brûlé » au soudage, un manchon incapable de transmettre les efforts prévus pour un filant ou la pose incorrecte d'armatures peuvent mettre gravement en péril la solidité d'un ouvrage.

De par ses activités de certification et de par son fonctionnement collégial (les professionnels, les utilisateurs et les experts de l'armature y sont représentés), elle connaît les risques que fait encourir une armature non conforme. Elle connaît les bonnes pratiques, mais également les possibilités d'amélioration dans ce domaine. Son rôle d'organisme de certification ne lui permet pas de proposer des solutions relatives à ce qu'il « faudrait faire ». Elle impose des résultats. Mais en aucun cas, elle ne propose ni n'impose des moyens à mettre en œuvre pour y parvenir. Imposer des moyens serait plus simple pour elle, mais présenterait de graves inconvénients :

- elle deviendrait juge et partie ;
- cela aurait une incidence économique qui n'est pas de son ressort ;
- le progrès économique des producteurs s'en trouverait entravé et il faudrait gérer de nombreuses dérogations, à chaque fois que de nouvelles techniques apparaîtraient.

L'AFCAB souhaite évidemment le progrès de l'armature, et pas seulement le progrès de sa qualité. De par son activité, de par sa constitution, elle a conscience de détenir un certain nombre de clés de ce progrès. En particulier, elle est consciente que ce progrès est entravé par le défaut de connaissance mutuelle des métiers des différents partenaires impliqués dans le cycle de fabrication et de pose des armatures. Par exemple, on oublie trop souvent que l'armature n'est pas seulement un produit qui se dessine ou qui se paie, c'est également un produit qui se fabrique et se pose, avec les impératifs que cela entraîne !

C'est pourquoi, lorsque Jean DITRICHSTEIN, qui possède la double expérience de professionnel de l'armature et d'ingénieur de contrôle technique de la construction, a eu l'idée de rédiger le présent document, elle a souhaité apporter son appui le plus déterminé à sa rédaction et sa publication. L'ambition de ce texte est justement de participer au progrès global de l'armature, en décrivant son cycle de fabrication et de pose, les contraintes et les opportunités d'amélioration qui en découlent. Nous avons constaté à de nombreuses reprises que la qualité progresse lorsque les points de vue, les contraintes et les intérêts de chacune des parties concernées sont confrontés, afin que des solutions prenant en compte au mieux tous ces aspects soient adoptées.

Ce guide technique comporte de nombreuses propositions d'amélioration tout au long du cycle de fabrication et de pose des armatures, à tous les partenaires de l'acte de construire en béton armé.

CIMBÉTON s'associe pleinement à cette logique de progrès visant à améliorer la qualité du béton armé et la pérennité des bâtiments et des ouvrages de génie civil. En mettant en commun leur expérience et leur savoir-faire, l'AFCAB et CIMBÉTON proposent des solutions constructives aux performances optimisées pour des ouvrages durables.

# Avant d'aller plus loin...

## Vocabulaire essentiel

---

Il est nécessaire pour la bonne compréhension de ce document de préciser dès maintenant la signification que nous donnerons à trois termes essentiels :

- « **aciers pour béton armé** » (en abrégé : « aciers »);
- « **armatures pour béton armé** » (en abrégé : « armatures »);
- « **armaturier** ».

### *Aciers*

La norme européenne EN 10080 « Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – Généralités » donne la définition de ce terme : « **Acier pour béton armé : produit en acier de section circulaire ou pratiquement circulaire qui est adapté pour l'armature du béton** ».

#### **Nota**

*Cette définition convient bien pour les barres, couronnes et produit déroulés, mais ce projet de norme traite également des treillis soudés qui sont donc considérés comme des « aciers », ce qui est cohérent avec la norme NF A 35-027 et les règles de certification de l'AFCAB. Il traite aussi des treillis raidisseurs.*

*En revanche, la plupart des normes françaises relatives aux barres, couronnes, produits déroulés et treillis soudés les désignent encore pour l'instant par « armatures ».*

*Le terme « treillis soudé » est réservé aux produits conformes à l'une des normes NF A 35-016 ou NF A 35-019, partie 2 (et plus tard à la norme EN 10080). Les assemblages plans de barres ou fils relevant de la norme NF A 35-027 sont désignés par « panneaux soudés » ou « panneaux pré-assemblés ». Les normes qui traitent des « treillis soudés » comportent certaines spécifications qui n'existent pas dans la norme NF A 35-027. Par exemple, la résistance au cisaillement des assemblages soudés est spécifiée, ce qui autorise leur prise en compte dans les ancrages et les recouvrements. Le régime de contrôle qualité prévu par ces normes est aussi différent.*

### ***Armatures***

Ce terme désigne les produits obtenus à partir des aciers définis ci-dessus par des opérations de dressage (pour les couronnes uniquement), coupe, façonnage et assemblage.

C'est la terminologie adoptée par les normes européennes. C'est également celle de la norme NF A 35-027, et des règles de certification de l'AFCAB. Auparavant, ces produits étaient désignés par « armatures industrielles ». Cette modification a permis de répondre à un objectif de clarification en particulier dans le domaine des certifications AFCAB. En effet, cet organisme certifie d'une part des aciers et d'autre part des armatures. Pour que des armatures soient certifiées, il faut qu'elles soient constituées d'aciers certifiés, mais cette condition nécessaire n'est pas suffisante. Il faut, de plus, que les opérations de dressage, coupe, façonnage et assemblage soient couvertes par la certification AFCAB armatures.

### ***Armaturier***

Professionnel dont le métier consiste à fabriquer des armatures et parfois à les poser en coffrage.

Ce terme est maintenant couramment utilisé dans le BTP et il a été adopté par la commission du dictionnaire de l'Académie française, le 25 septembre 2003.

# Sommaire

---

● 1 - Introduction	11
<b>1.1 Objectifs</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Cheminement</b>	<b>13</b>

---

● 2 - Production des aciers pour béton	15
--	----

---

● 3 - Cycle des armatures	21
<b>3.1 Classification des armatures</b>	<b>22</b>
3.1.1 - Armatures sur plans	22
3.1.2 - Armatures sur catalogue	22
3.1.3 - Armatures spéciales	23
<b>3.2 Armatures sur plans</b>	<b>25</b>
3.2.1 - Préparation de la fabrication – Analyse des plans	26
3.2.2 - Fabrication des armatures sur plans	28
<b>3.3 Armatures sur catalogue</b>	<b>32</b>
3.3.1 - Préparation de la fabrication	32
3.3.2 - Fabrication des armatures sur catalogue	32
<b>3.4 Armatures spéciales</b>	<b>35</b>
3.4.1 - Boîtes d’attentes	35
3.4.2 - Dispositifs de rabouillage	36
<b>3.5 Pose en coffrage</b>	<b>36</b>

---

● 4 - Pour une armature conforme	37
<b>4.1 Contexte réglementaire</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Caractéristiques certifiées des aciers</b>	<b>42</b>
4.2.1 - Soudabilité et composition chimique	42
4.2.2 - Caractéristiques mécaniques en traction	42
4.2.3 - Diamètres, sections, masses linéiques et tolérances	45
4.2.4 - Adhérence et géométrie de la surface	46
4.2.5 - Non fragilité (aptitude au pliage)	46
4.2.6 - Dimensions et résistance au cisaillement des assemblages soudés des treillis soudés	46
4.2.7 - Résistance à la fatigue	47
4.2.8 - Aptitude au redressage après pliage	47
<b>4.3 Conformité des armatures</b>	<b>47</b>
4.3.1 - Dressage	47
4.3.2 - Coupe	48
4.3.3 - Façonnage	48
4.3.4 - Assemblage	60

4.3.5 - Pose en coffrage et position finale des armatures	62
4.3.6 - Armatures manchonnées	70
4.3.7 - Boîtes d'attentes	70
<b>4.4 Certifications gérées par l'AFCAB</b>	<b>71</b>
4.4.1 - Certification NF – Aciers pour béton armé	71
4.4.2 - Certification AFCAB – Dispositifs de raboutage ou d'ancrage des armatures du béton	72
4.4.3 - Certification NF – Armatures	72
4.4.4 - Certification AFCAB – Pose des armatures du béton	73
<hr/>	
● 5 - Pour une armature parfaitement définie	75
<b>5.1 Repères et nombre d'armatures</b>	<b>78</b>
<b>5.2 Dimensions et angles de façonnage des armatures</b>	<b>78</b>
5.2.1 - Cas particulier des ancrages	79
5.2.2 - Armatures « variables »	81
<b>5.3 Choix des mandrins de façonnage</b>	<b>82</b>
<b>5.4 Fermetures des cadres</b>	<b>87</b>
<b>5.5 Positions relatives des barres entre elles</b>	<b>87</b>
5.5.1 - Lits de barres superposés	87
5.5.2 - Barres « flottantes »	88
<b>5.6 Enrobage</b>	<b>88</b>
<b>5.7 Réservations</b>	<b>89</b>
<b>5.8 Armatures de formes « spéciales »</b>	<b>89</b>
<hr/>	
● 6 - Pour une armature plus simple, ou tout au moins réalisable	91
<b>6.1 Fermeture des cadres</b>	<b>93</b>
<b>6.2 Choix de la forme des armatures transversales des poutres</b>	<b>98</b>
<b>6.3 Ancrages par crosses sur plusieurs lits</b>	<b>99</b>
<b>6.4 Jonction entre chaînages de murs perpendiculaires</b>	<b>102</b>
<b>6.5 Appui intermédiaire de poutre sur poteau</b>	<b>103</b>
<b>6.6 Appui intermédiaire d'une poutre sur une autre poutre</b>	<b>104</b>
<b>6.7 Poutre s'appuyant sur deux poutres porteuses</b>	<b>105</b>
<b>6.8 Ouvrages spéciaux</b>	<b>106</b>
<hr/>	

●	<b>7 - Pour une optimisation globale de l'armature</b>	<b>109</b>
	<b>7.1 Études d'optimisation globale</b>	<b>110</b>
	<b>7.2 Importance de la conception du ferrailage</b>	<b>111</b>
	<b>7.3 Évolutions depuis les origines du béton armé</b>	<b>111</b>
	<b>7.4 Comparaison des habitudes de divers pays</b>	<b>112</b>
	7.4.1 - Diamètres des aciers utilisés.	112
	7.4.2 - Utilisation des étriers	113
	7.4.3 - Fermetures des cadres	113
	<b>7.5 Choix des espacements des armatures transversales</b>	<b>114</b>
	<b>7.6 Nombre de repères différents</b>	<b>114</b>
	<b>7.7 Diamètres des mandrins de façonnage</b>	<b>115</b>
	<b>7.8 Exemple</b>	<b>115</b>
<hr/>		
●	<b>8 - Conclusions</b>	<b>119</b>
<hr/>		
●	<b>9 - Annexes</b>	<b>123</b>
	<b>Annexe 1 Analyse des prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-1 (projet d'avril 2004) relatives au façonnage</b>	<b>124</b>
	1 - Tableau 8.1 N de l'article 8.3(2). Diamètres minimaux de façonnage	124
	2 - Article 8.3(3). Justification vis-à-vis de la rupture du béton. Cas des armatures transversales	125
	3 - Définition précise des diamètres de mandrins	126
	<b>Annexe 2 Processus de détermination de l'enrobage nominal suivant l'Eurocode 2 Partie 1-1 complété par son Annexe Nationale Française</b>	<b>127</b>
	1 - Détermination de la classe d'exposition de la structure	127
	2 - Choix de la classe structurale	127
	3 - Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité « $C_{min,dur}$ »	128
	4 - Prise en compte des réductions et (ou) des augmentations éventuelles de « $C_{min,dur}$ »	128
	5 - Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence « $C_{min,b}$ »	128
	6 - Détermination de l'enrobage minimal « $C_{min}$ »	129
	7 - Prise en compte des tolérances d'exécution. Détermination de l'enrobage nominal « $C_{nom}$ »	129



Chapitre

# 1

# Introduction

**1.1 Objectifs**

**1.2 Cheminement**

## 1.1 Objectif

Il existe de nombreux livres consacrés au béton armé, mais la majorité d'entre eux traite du calcul des ouvrages et n'envisage l'armature que sous cet angle. L'aspect technologique n'est abordé que dans quelques « cours » dont l'objectif est en général de rappeler et expliciter les textes réglementaires.

Longtemps, la fabrication des armatures n'a été qu'une (petite) partie du travail des maçons. C'est peut-être pourquoi la profession des armaturiers est encore mal connue de leurs partenaires professionnels. Beaucoup de projeteurs de bureaux d'études ou de conducteurs de travaux d'entreprises n'ont jamais visité d'atelier de production d'armatures et ont une idée très floue des moyens qu'on y utilise. Pourtant, le travail rudimentaire du « plieur de barres » a considérablement évolué. Aujourd'hui, il est suffisamment complexe pour avoir justifié la création d'une certification de conformité spécifique. Cette certification, délivrée par l'AFCAB, impose bien entendu le respect d'un certain nombre de règles. Dans cette démarche, les armaturiers rencontrent des difficultés qui ont leur origine dans la conception même de l'armature. Il s'agit parfois d'erreurs manifestes, mais souvent, on constate que seule la connaissance approfondie des impératifs de fabrication et de mise en œuvre aurait permis de choisir les dispositions optimales satisfaisant à la fois aux exigences réglementaires et à celles de l'exécution.

Il est bien compréhensible que l'aspect « calcul » constitue la préoccupation dominante. Cependant l'armature n'est pas seulement une section à calculer et une forme à dessiner. C'est aussi un produit à fabriquer et à poser dans un coffrage.

Lorsque la section des armatures a été déterminée d'autres choix restent à faire, tels que les diamètres des barres, les espacements d'armatures, la forme des ancrages, etc. Le plus souvent les prescriptions des textes réglementaires fixent sur ces points des limites ou des conditions à respecter, mais laissent au concepteur de la structure de grandes marges de liberté. C'est à ce stade de l'étude que doivent être pris en compte les critères liés à la fabrication et à la mise en œuvre.

Depuis quelques décennies de nouveaux partenaires encore plus éloignés des armaturiers interviennent de plus en plus. Il s'agit des informaticiens qui conçoivent les logiciels de dessins d'armatures. Cette tâche ne peut être correctement assurée que si elle intègre les impératifs de fabrication et de pose. Les utilisateurs de ces logiciels sont aussi souvent informaticiens de formation. Ils ont remplacé les projeteurs dont ils ne possèdent pas toujours l'expérience pratique. L'informatisation tend aussi à éliminer l'usage du papier au profit de celui de

l'écran. Cet outil présente des avantages incontestables, mais il ne permet sans doute pas la même qualité de réflexion que l'examen simultané d'un plan d'ensemble de coffrage et d'un plan de détail.

L'objectif de ce guide technique est donc de mettre l'accent sur tout ce qui peut contribuer à la qualité finale de l'armature en place dans l'ouvrage, en particulier en prenant en compte la complémentarité des rôles respectifs des bureaux d'études et des armaturiers. Pour cela, il sera souvent nécessaire de présenter des « exemples » de dispositions à éviter. Bien entendu, des solutions alternatives mieux adaptées seront alors proposées.

## 1.2 Cheminement

Les chapitres 2 et 3 sont consacrés respectivement à une **présentation générale des aciers** et du **cycle de fabrication des armatures**. On y trouvera des éléments utiles à la bonne compréhension de certains points exposés par la suite.

Les chapitres suivants se succèdent selon un ordre d'exigence et d'ambition croissantes en matière de qualité de l'armature.

- **Chapitre 4: Pour une armature conforme**

En rappelant les prescriptions qui visent spécifiquement l'armature, ce chapitre présente en particulier les changements résultant de l'application des nouveaux textes réglementaires (Eurocode 2, etc.).

- **Chapitre 5: Pour une armature parfaitement définie**

Ce chapitre met l'accent sur tout ce que le concepteur doit préciser au fabricant pour qu'il puisse réaliser une armature répondant exactement à ce qu'il a étudié sans risque d'interprétation ou d'improvisation.

- **Chapitre 6: Pour une armature plus simple, ou tout au moins réalisable**

Ce chapitre a pour objet d'illustrer par des exemples précis comment la fabrication et la pose des armatures peuvent être facilitées (ou au contraire rendues difficiles, voire impossibles) par le dessin et la conception choisis par le bureau d'études.

- **Chapitre 7: Vers une optimisation globale de l'armature?**

Le dernier chapitre formule un certain nombre d'interrogations et propose d'explorer quelques « pistes » pour faire progresser la qualité de l'armature, certaines impliquant peut-être de remettre en question le principe même des relations entre les divers intervenants.



Chapitre

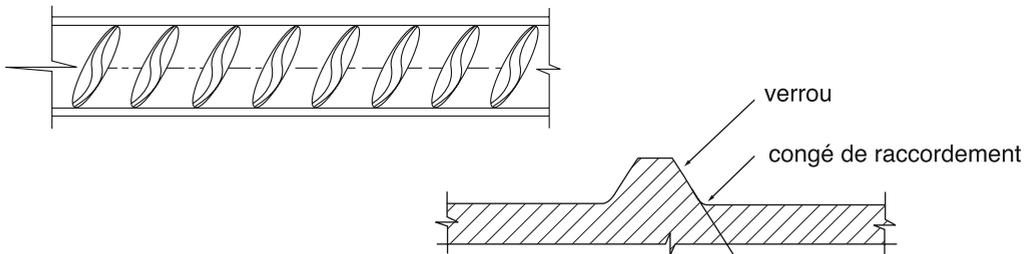
# 2

# Production des aciers pour béton

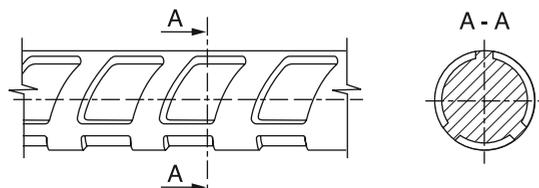
Au cours des premières décennies de l'histoire du béton armé, les armatures étaient constituées de barres d'acier doux, lisses, de section circulaire dont la limite d'élasticité était habituellement comprise entre 215 et 235 MPa. Ce type d'acier n'est pratiquement plus utilisé. En effet, les ingénieurs ont cherché à employer des aciers de limite d'élasticité plus élevée afin de réduire les sections d'armatures. L'impact économique de cette évolution a été double, puisqu'il a aussi permis de diminuer les dimensions des pièces en béton.

Cependant, le fonctionnement du béton armé suppose une « association » entre l'acier et le béton qui met en jeu l'adhérence des armatures au béton. Pour utiliser pleinement des aciers plus performants, il faut donc aussi que leur adhérence soit améliorée. On a par conséquent évolué vers des aciers qui sont à la fois à Haute Limite d'Élasticité (HLE) et à Haute Adhérence (HA).

La haute adhérence résulte de la création d'aspérités en saillie ou en creux. Les aspérités en saillie inclinées par rapport à l'axe de la barre sont appelées « verrous ». Les aspérités en creux sont appelées « empreintes ».



**Figure n° 1 : schéma d'un acier à verrous.**



**Figure n° 2 : schéma d'un acier à empreintes.**



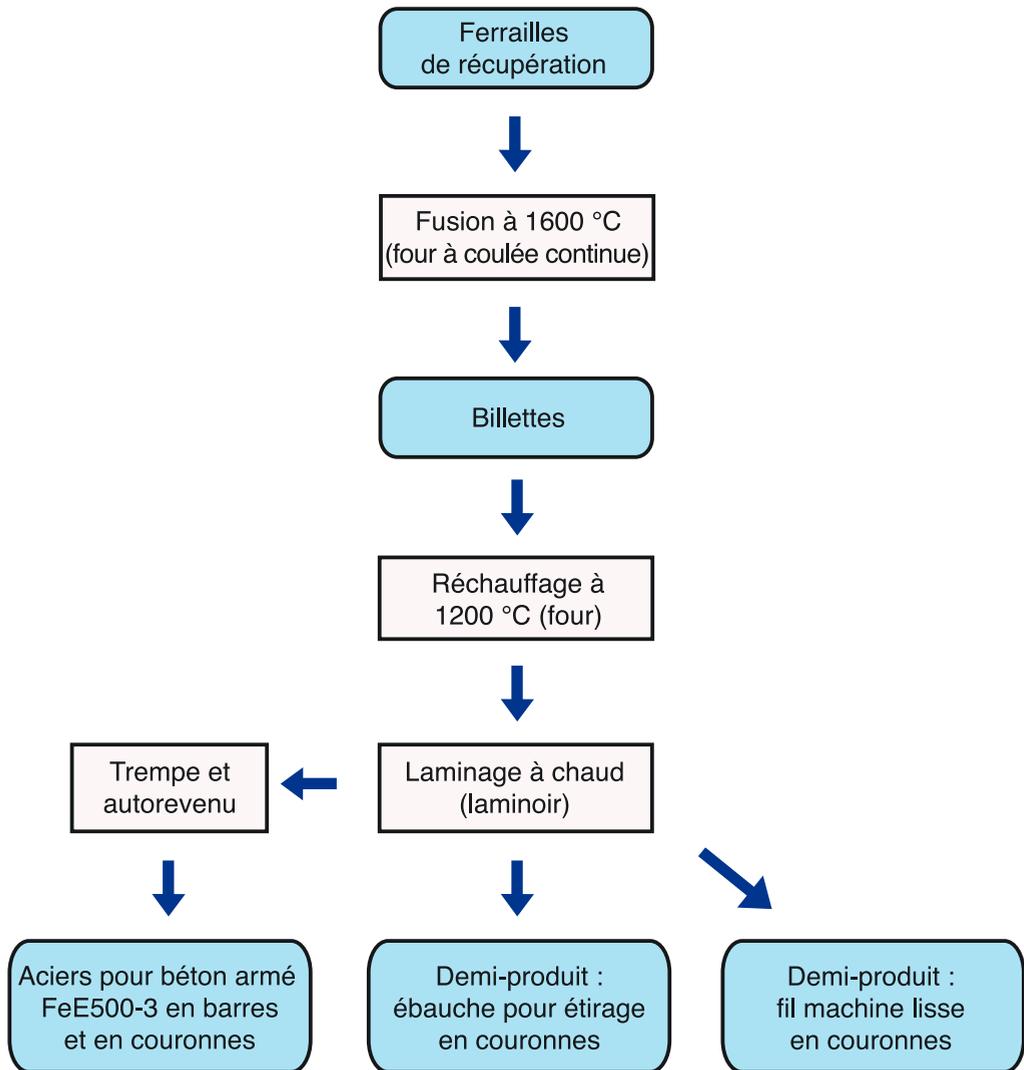
*Aciers en barres et en couronnes et treillis soudés.*

La haute limite d'élasticité peut être obtenue par différents moyens :

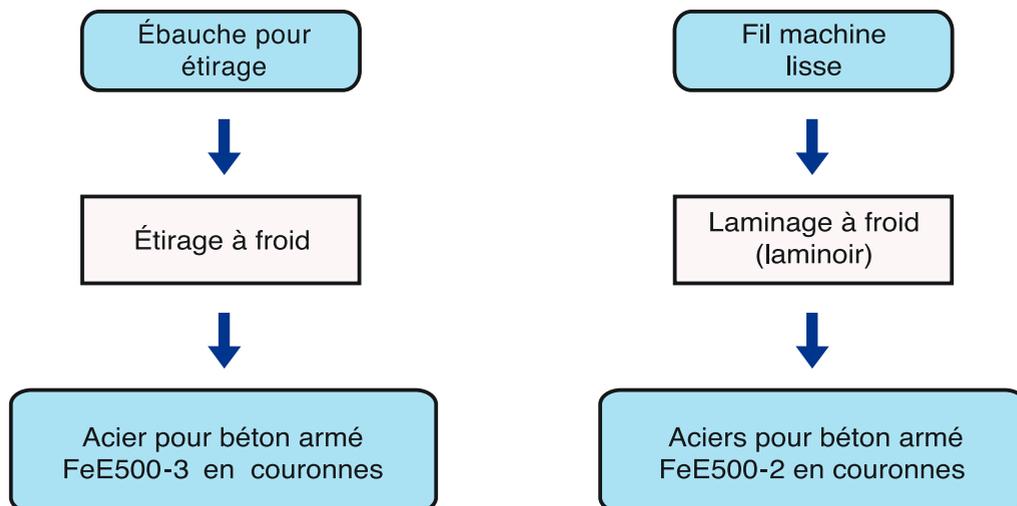
- en jouant sur la composition chimique, en particulier en augmentant la teneur en carbone. Ce type d'acier présente des inconvénients notamment dans les domaines de l'aptitude au façonnage et au soudage. Il est maintenant abandonné en Europe ;
- par écrouissage, par étirage et ou laminage à froid de barres ou fils d'acier doux ;
- par traitement thermique (trempe et autorevenu) de barres ou fils d'acier doux.

Les aciers se présentent sous forme de barres de grande longueur (souvent 12 m) ou de fils en couronnes.

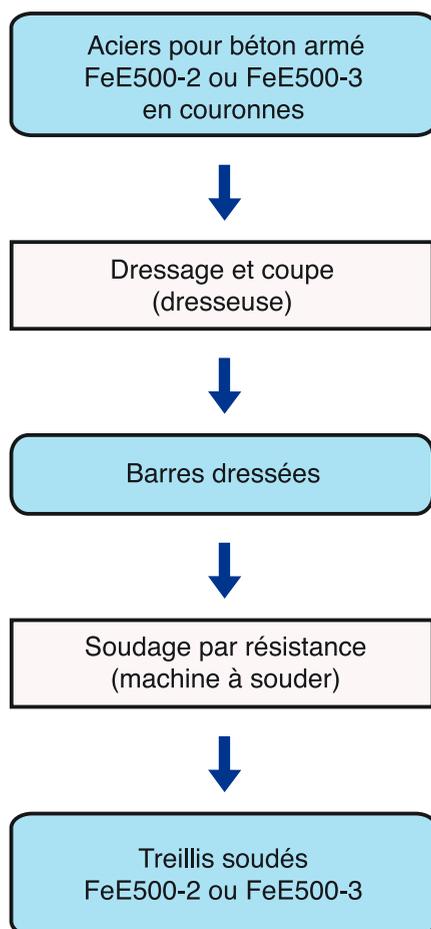
Les cycles de productions utilisés aujourd'hui correspondent aux figures n° 3, 4 et 5. Ces techniques permettent de conférer aux aciers des caractéristiques adaptées à leur utilisation sous forme d'armatures pour le béton.



**Figure n° 3: aciers laminés à chaud – cycle de production.**



**Figure n° 4: aciers laminés à froid – cycle de production.**



**Figure n° 5: treillis soudés – cycle de production.**





Chapitre

# 3

# Cycle des armatures

**3.1 Classification des armatures**

**3.2 Armatures sur plans**

**3.3 Armatures sur catalogue**

**3.4 Armatures spéciales**

**3.5 Pose en coffrage**

Le cycle des armatures englobe toutes les opérations qui, partant des aciers en barres et en couronnes, se terminent lorsque les armatures ont été mises en place dans le coffrage et contrôlées avant bétonnage.

Il existe plusieurs processus aboutissant à ce résultat. Tout d'abord, les aciers en couronnes doivent être dressés et leur caractéristique de continuité conduit à l'utilisation de machines différentes de celles adoptées pour les aciers en barres. Ensuite, plusieurs choix sont possibles dans la répartition des opérations entre l'atelier d'armature et le chantier. Enfin, les moyens de production mis en œuvre varient suivant la « catégorie » des armatures.

## 3.1 Classification des armatures

La norme NF A 35-027 définit **trois catégories d'armatures**.

### 3.1.1 – Armatures sur plans

---

**Elles sont fabriquées à partir de plans fournis par le client.** Cette catégorie correspond aux armatures des structures en béton armé d'ouvrages de génie civil ou de grands bâtiments. Chacune de ces structures fait l'objet d'une étude spécifique qui comporte en particulier l'établissement de plans d'armatures.

### 3.1.2 – Armatures sur catalogue

---

**Elles sont conçues sous la responsabilité du fabricant** et décrites dans un catalogue approuvé par un bureau de contrôle technique.



*Armatures sur plans  
assemblées.*



*Armatures sur catalogue.*

Ces armatures sont aussi appelées « armatures standard », car elles résultent d'une démarche de standardisation. À l'origine il s'agissait essentiellement d'armatures de chaînages répondant aux prescriptions des règles techniques applicables aux constructions en maçonnerie ou en béton banché (Documents Techniques Unifiés). Par la suite, les armaturiers spécialisés dans ce type de fabrication ont intégré dans leurs catalogues des armatures destinées à être utilisées dans des semelles de fondations, des poteaux, des linteaux, etc. Aujourd'hui, plusieurs producteurs proposent des gammes d'armatures couvrant la totalité des besoins pour les maisons individuelles et d'autres bâtiments simples. Ces armatures sont conditionnées en paquets ou fardeaux et sont en grande partie distribuées par le canal des négociants en matériaux, à destination des artisans et des petites entreprises.

Les règles de certification de l'AFCAB spécifient que les catalogues des armatures ou les documents de production qui leur sont associés contiennent des informations complètes sur leur constitution et précisent aussi l'utilisation prévue et éventuellement les performances pour cette utilisation.

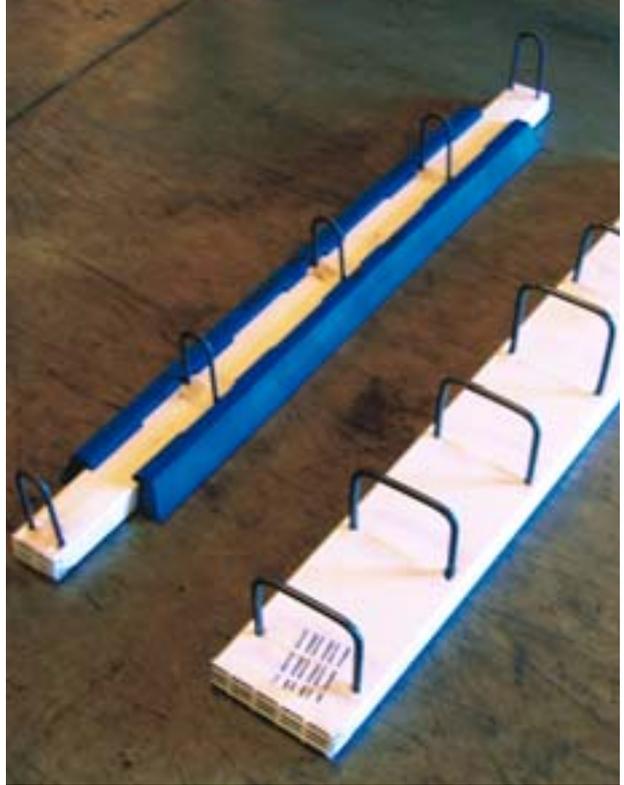
### **3.1.3 – Armatures spéciales**

---

**Elles comportent des accessoires ou dispositifs spéciaux** (par exemple dispositifs de raboutage ou d'ancrage des armatures du béton, boîtes d'attente) ou sont composées d'aciers pour béton armé particuliers tels que les aciers galvanisés ou les aciers inoxydables.



Armature filetée pour manchonnage.



Boîte d'attente.

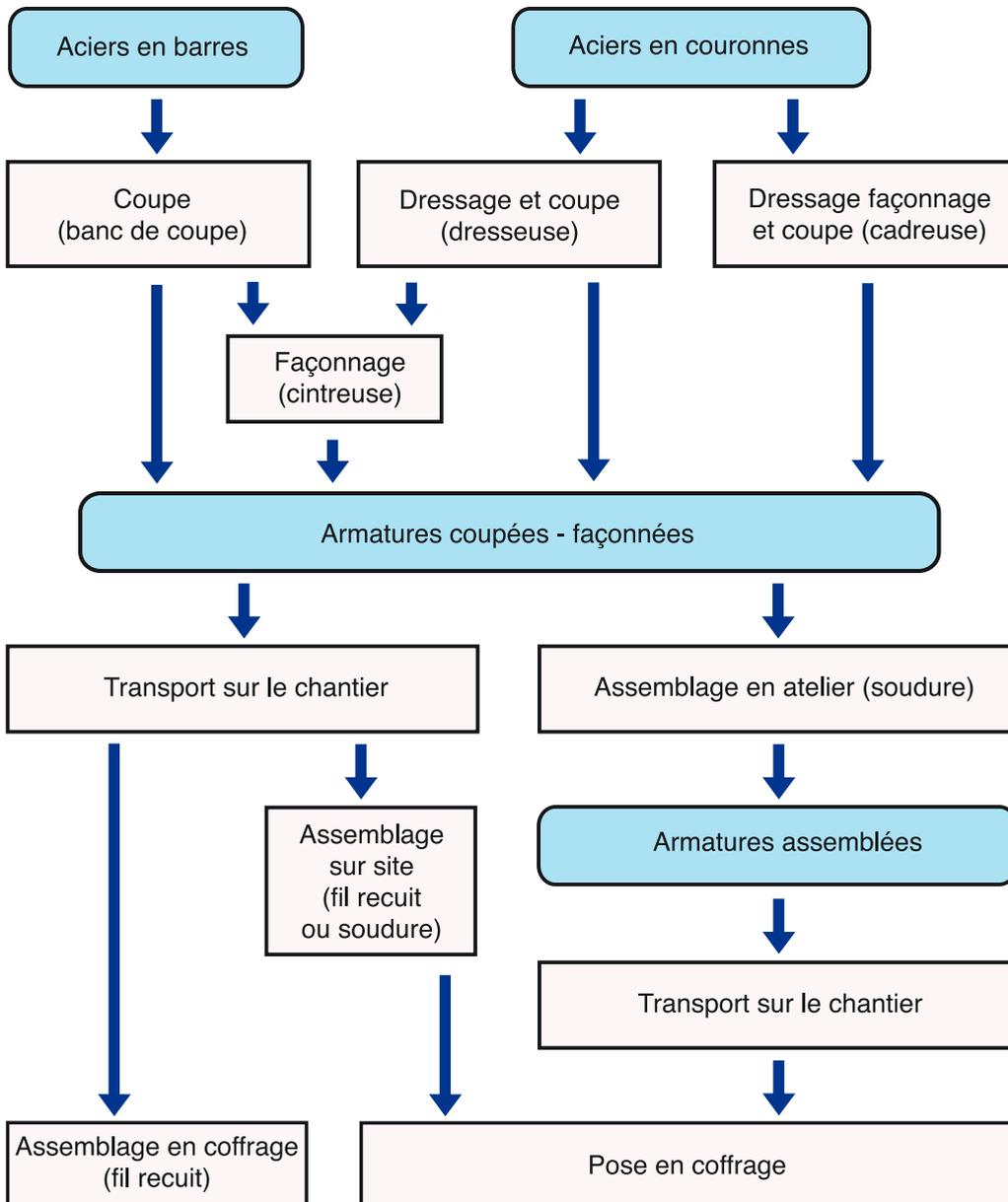
Armatures sur plans coupées-façonnées.



Parallèlement aux catégories qui viennent d'être décrites, on distingue aussi les « **armatures coupées-façonnées** » qui, comme leur nom l'indique sont obtenues par coupe et façonnage des aciers, et les « **armatures assemblées** » qui sont constituées par l'assemblage des armatures coupées-façonnées sous forme de « cages » ou de « panneaux ».

## 3.2 Armatures sur plans

La figure n° 6 présente les divers processus de production des armatures sur plans habituellement utilisés.



**Figure n° 6: cycle des armatures sur plans.**

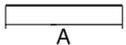
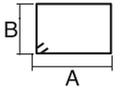
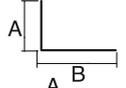
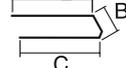
Dans le cas des « armatures sur plans » la fabrication proprement dite est le plus souvent précédée d'un travail de préparation très important.

### 3.2.1 – Préparation de la fabrication – Analyse des plans

Cette phase de préparation peut prendre différentes formes en fonction du contenu de la commande d'armatures.

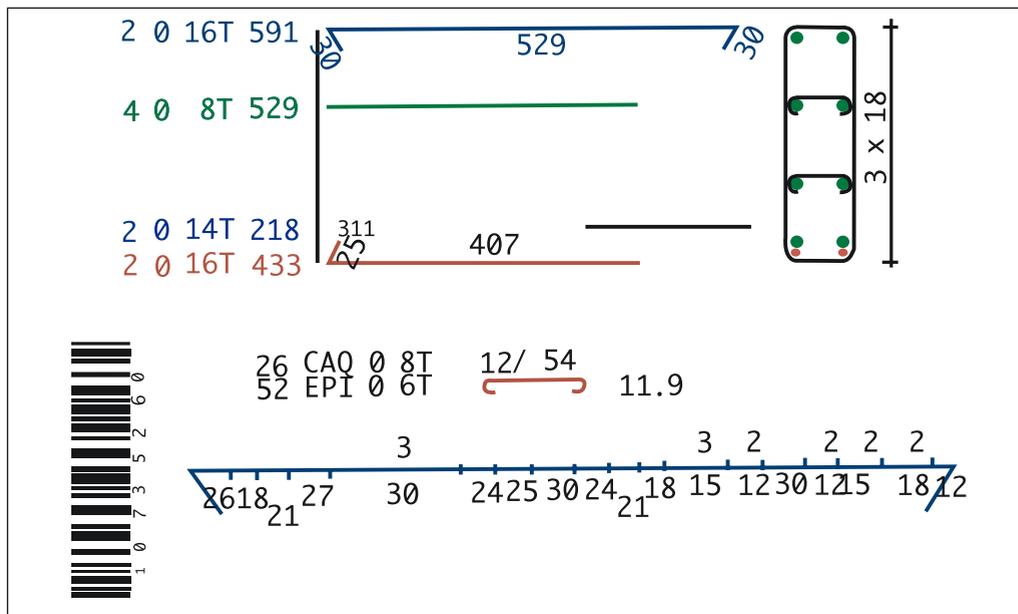
Le **premier cas** est celui d'une commande d'armatures coupées-façonnées à un armaturier chargé uniquement de la fabrication. En général ce type de commande émane d'une entreprise spécialisée dans la pose sur chantier, titulaire d'un marché complet de fourniture et pose des armatures. Ce « poseur » effectue en général un travail préalable avec le bureau d'études afin que la conception du ferrailage tienne compte du processus de mise en coffrage qu'elle a adopté.

L'atelier de fabrication reçoit de son client des listes (ou nomenclatures) d'armatures. Ces documents ne donnent aucune indication sur la destination ou la fonction de chaque armature coupée-façonnée.

Rep. Barre	Dia	Nb d'elem.	Nb de barres	Nb. total	Long	Code Forme	Type mandr.	Dimensions	Schéma	Rev
	mm				mm			mm		
1	HA12	1	4	4	3 110	0.00	0	A = 3 112		
2	HA12	1	312	312	2 620	5.20	2	A = 480 B = 715		
3	HA20	1	108	108	2 730	1.04	1	A = 1 837 B = 960		
4	HA12	1	42	42	1 900	9.99	2	A = 600 B = 742 C = 600 $\alpha 1 = 84^\circ$ $\alpha 2 = 98^\circ$		

**Figure n° 7: exemple de liste ou nomenclature d'armatures.**

L'armaturier est alors un simple exécutant. Parfois les nomenclatures sont utilisées directement pour la fabrication. Le plus souvent, elles sont transcrites sous forme d'ordres de fabrication manuscrits ou informatisés, qui constituent des plans d'atelier. Ces documents de production sont en général édités en plusieurs exemplaires. L'un des exemplaires constitue l'étiquette d'identification qui restera attachée à l'armature jusqu'à sa pose en coffrage.



**Figure n° 8: exemple d'ordre de fabrication établi par un armaturier.**

Le **deuxième cas** concerne la commande d'armatures à livrer assemblées dans toute la mesure du possible. Ce type de commande peut être passé par une société spécialisée dans la pose des armatures ou par une entreprise de gros œuvre en maçonnerie ou béton armé.

L'armaturier dispose alors de plans complets de ferrailage et de coffrage. Cependant, ces plans ne constituent pas des « plans d'atelier » utilisables pour la fabrication ; ils sont confiés à des « préparateurs » ou « décortiqueurs » dont le travail consiste à :

- s'assurer que les armatures figurant sur les plans sont conformes, qu'elles sont définies sans ambiguïté, qu'elles sont réalisables et que leur pose en coffrage ne présentera pas de difficulté insurmontable ;
- proposer éventuellement les modifications nécessaires ou souhaitables ;
- définir les ensembles qui constitueront des cages assemblées et les armatures qui devront au contraire être livrées « non montées » pour faciliter la pose en coffrage ;
- établir les documents de productions adaptés aux moyens et à l'organisation de l'atelier.

Le travail des décortiqueurs nécessite naturellement une bonne connaissance du processus de fabrication et de pose en coffrage ; il exige aussi une excellente vision de l'armature dans l'espace. Ce travail s'effectue bien entendu en accord avec le bureau d'études et l'entreprise chargée de la pose

Le **troisième cas** est celui où la fabrication et la pose sont assurées par une même société. La préparation se fait alors en commun entre l'atelier et le service pose de cette société suivant les principes décrits ci-dessus.

## 3.2.2 – Fabrication des armatures sur plans

---

### ■ 3.2.2.1 – Dressage

La recherche d'une diminution des chutes d'acier et d'une meilleure productivité a conduit à un développement des aciers livrés en couronnes plutôt qu'en barres. Limité à l'origine aux petits diamètres, ce conditionnement existe aujourd'hui jusqu'au diamètre 16 mm. Cette opération est réalisée dans une dresseuse. Le principe consiste à faire passer le fil dans une « chicane » constituée de cadres tournants ou de galets. Certaines machines (dresseuses) effectuent uniquement le dressage et la coupe en barres droites, d'autres (cadreuses) réalisent le façonnage directement après cette opération.



*Dresseuse.*

*Dresseuse-cadreuse.*



### ■ 3.2.2.2 – Coupe

C'est une opération simple qui s'effectue, soit directement sur les barres avec des cisailles mécaniques, soit sur les dresseuses dans le cas des fils livrés en couronnes. Dans les cadreuses, la coupe est effectuée en fin de façonnage.



*Cisaille.*

### ■ 3.2.2.3 – Façonnage

Le façonnage est réalisé à froid.

Dans le cas des fils, le façonnage s'effectue directement après le dressage dans des cadreuses. Les formes sont programmées par l'opérateur à partir des documents de production (nomenclatures, étiquettes ou bons de fabrication selon le cas, comme indiqué au paragraphe 3.2.1).

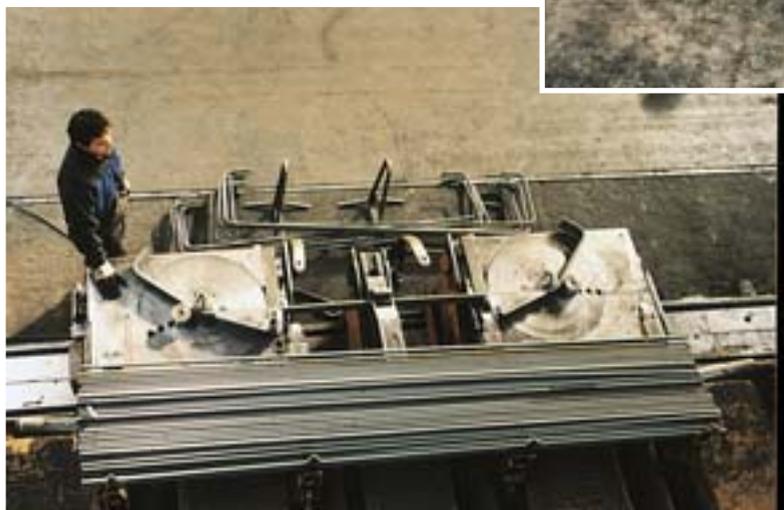
Les barres coupées sont façonnées sur des cintreuses. Les armatures comportant deux pliages sont assez fréquentes. De ce fait beaucoup de cintreuses sont équipées de deux têtes de façonnage pouvant fonctionner simultanément.

Toutes ces machines comportent une gamme de mandrins de cintrage correspondant aux diamètres des fils ou barres façonnés.

On utilise des cintreuses à trois galets pour le façonnage des aciers avec des rayons très élevés, pour réaliser par exemple les cerces de réservoirs circulaires ou les armatures d'arcs ou de voûtes.



*Cintreuse  
trois galets.*



*Cintreuse  
deux têtes.*

#### ■ 3.2.2.4 – Assemblage

L'assemblage des différentes armatures coupées façonnées (appelé aussi couramment montage) est réalisé soit en usine, soit sur chantier. L'assemblage en usine est beaucoup plus développé en France, que dans tout autre pays. Le choix entre ces deux solutions est effectué à partir de critères économiques dans lesquels interviennent, surtout le volume des cages et la distance entre l'atelier et le chantier.

En effet, l'assemblage en atelier est plus rapide et plus économique mais conduit à transporter des cages volumineuses. En revanche, les armatures coupées façonnées permettent d'utiliser la charge maximale des camions pour la livraison au chantier. Même dans le cas où l'essentiel des armatures est assemblé en atelier, une partie reste nécessairement « non-montée » pour des raisons pratiques liées à la pose en coffrage. Ce sont les compétences des décortiqueurs et des poseurs qui permettent d'effectuer les meilleurs choix.

En atelier, l'assemblage est réalisé par soudure. Il s'agit uniquement de soudures « de montage » dont la fonction est d'assurer le bon positionnement des armatures façonnées entre elles y compris pendant les transports, les manutentions et la mise en place du béton.



*Soudage par résistance.*



*Soudage semi-automatique.*

Parmi les divers procédés de soudage, deux sont essentiellement utilisés par les armaturiers :

- soudage par résistance. C'est un soudage sans métal d'apport par passage d'un courant électrique de forte intensité combiné à un effet de pression entre les pièces à assembler. On l'appelle souvent soudage « à la pince » ;
- soudage semi-automatique « MAG ». C'est un soudage à l'arc sous flux gazeux avec fil électrode fusible. Le fil conditionné sous forme de bobine, à la fois électrode et métal d'apport, est amené de façon automatique et continue par un dévidoir et des galets d'entraînement à la torche, qui est tenue à la main. L'arc électrique se produit entre les armatures et le fil fusible.

Les armatures sur plans ont par définition des formes très variées. Elles nécessitent donc des dispositifs tout aussi variés pour faciliter leur assemblage. Pour la forme de cage la plus courante qui est celle des poutres ou des poteaux, on utilise en général des tréteaux sur lesquels on pose les armatures longitudinales. Les cadres sont ensuite engagés sur celles-ci, soit par la fermeture des cadres, soit par une extrémité des armatures longitudinales.

D'une façon générale, la plus ou moins grande facilité d'assemblage dépend directement de la conception des armatures.



*Poutre en cours de montage.*



Sur chantier l'assemblage est effectué soit en atelier « forain » installé à proximité de l'ouvrage, soit directement en coffrage. En général ces deux solutions coexistent. L'entrepreneur assurant la pose choisit au cas par cas celle qu'il estime la plus pratique. Il est possible de souder sur site, mais le plus souvent, le montage se fait par ligatures avec des fils d'attache en acier recuit.

## 3.3 Armatures sur catalogue

### 3.3.1 – Préparation de la fabrication

---

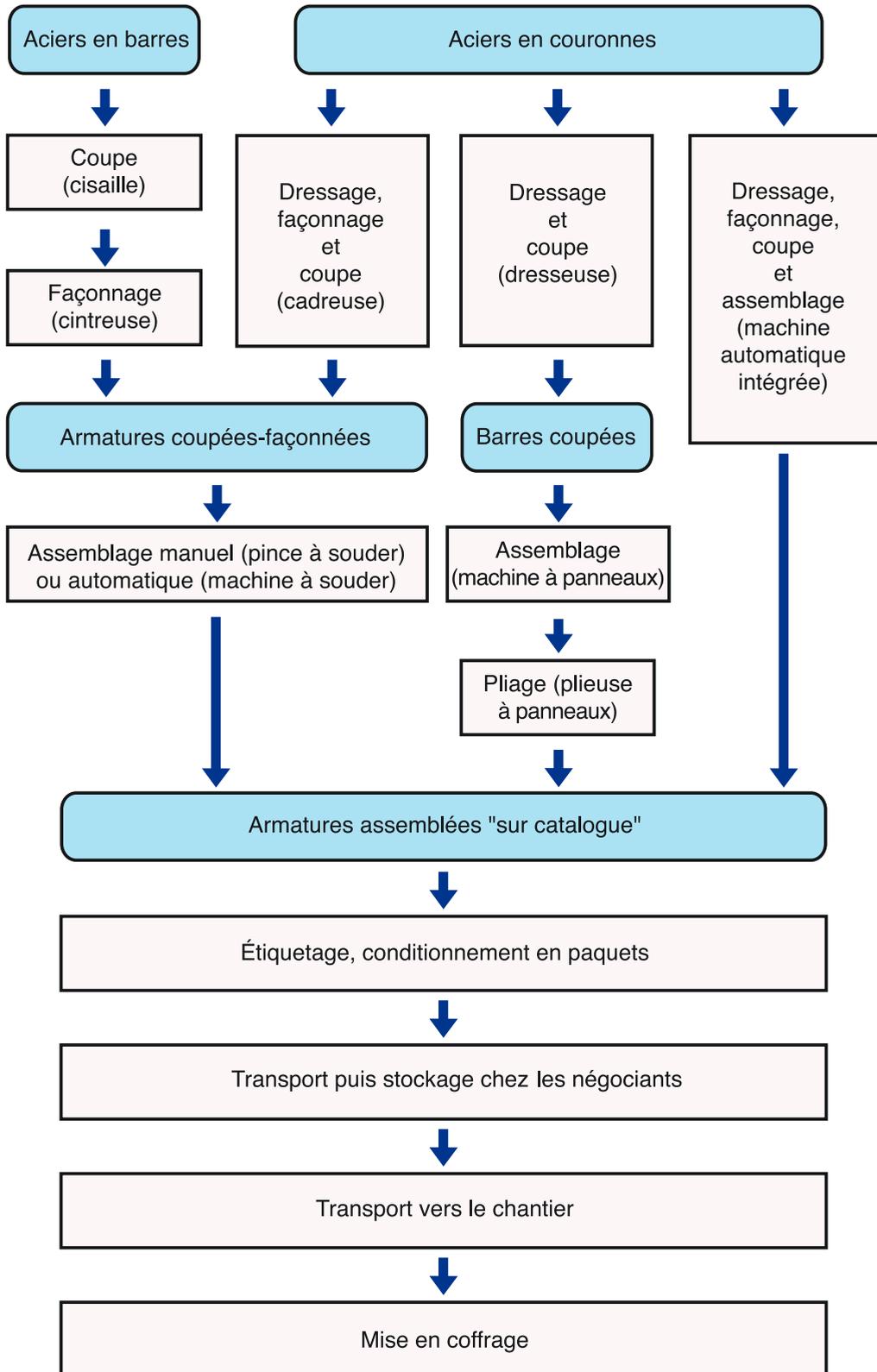
La préparation est effectuée lors de l'étude du catalogue. Chaque référence est définie par une fiche de fabrication et fait l'objet d'instructions relatives à l'étiquetage et au conditionnement.

Le plus souvent l'armaturier n'a aucune information sur l'ouvrage dans lequel les armatures qu'il livre seront intégrées. Quand il reçoit une commande spécifique, elle se présente sous la forme d'une nomenclature indiquant les nombres de chacun des produits du catalogue désignés par leur référence sans préciser leur composition. Cette nomenclature est parfois accompagnée d'un plan de pose sur lequel est simplement repérée la position de chaque armature.

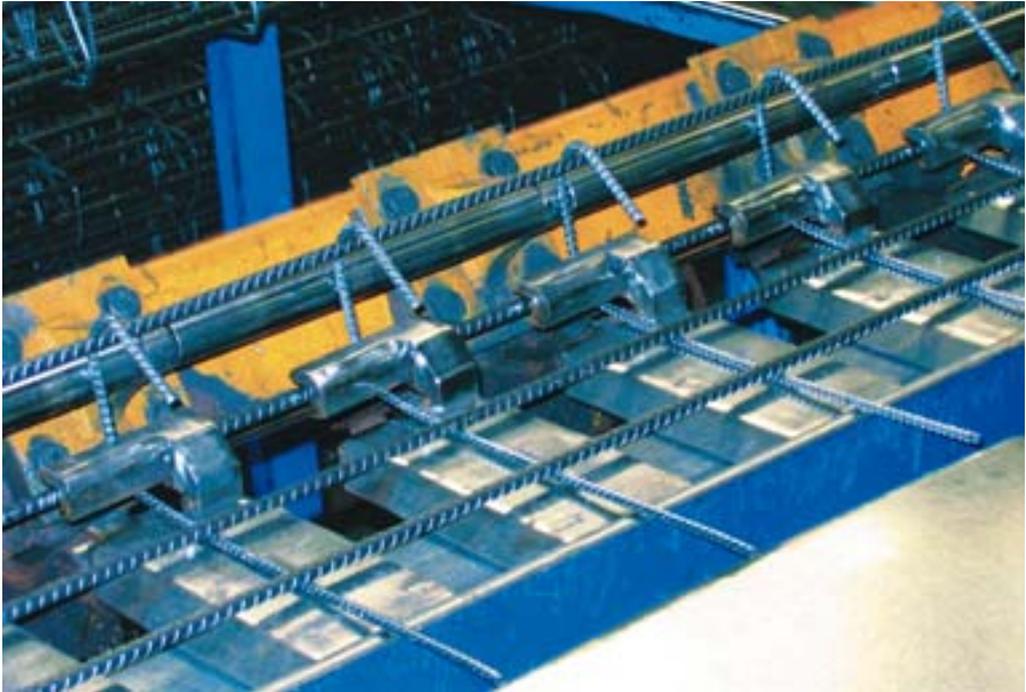
### 3.3.2 – Fabrication des armatures sur catalogue

---

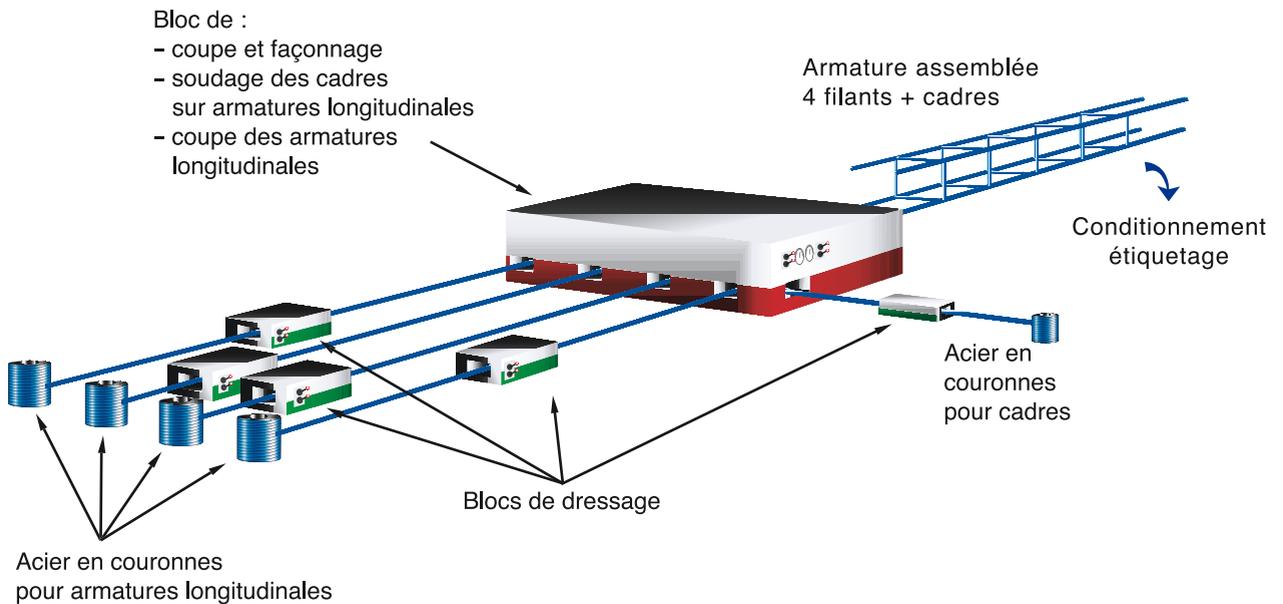
Les armatures sur catalogue se différencient des armatures sur plans par plusieurs caractéristiques : leurs formes et dimensions sont répétitives et une grande partie d'entre elles se présente sous la forme de cages de longueur 6 m, avec des cadres rectangulaires régulièrement espacés. Ces caractéristiques ont permis de développer des outils de production spécifiques. Dans les divers processus existants, une partie ou la totalité des phases de la fabrication est automatisée. Certaines machines intègrent dans un seul ensemble la totalité des opérations de dressage, coupe, façonnage et assemblage. Elles produisent des armatures assemblées directement à partir de fil en couronne.



**Figure n° 9: cycle des armatures sur catalogue.**



*Plieuse en cours de façonnage.*



**Figure n° 10: schéma de principe de machine totalement automatique à partir d'acier en couronne.**

## 3.4 Armatures spéciales

Les armatures destinées à être intégrées dans des « boîtes d'attentes » ou préparées pour être raccordées à des « manchons » ou « coupleurs » entrent dans la catégorie des armatures spéciales.

En général une structure en béton armé est coffrée et bétonnée en plusieurs phases successives. Dans ce cas, il faut assurer la continuité du ferrailage entre les parties contiguës de structure à travers la reprise de bétonnage qui les sépare. Les « boîtes d'attentes » et les « dispositifs de raboutage » (appelés aussi coupleurs ou manchons) permettent de résoudre ce problème.

### 3.4.1 – Boîtes d'attentes

---

Les boîtes d'attentes comportent des armatures façonnées dont une extrémité est repliée à l'intérieur d'un volume creux réalisé sous forme de boîte ou de profilé. L'ensemble ainsi constitué est fixé contre le coffrage à l'intérieur de la partie de structure bétonnée en première phase. Après décoffrage de cette première partie la boîte est ouverte, en général retirée, et les armatures en attente dépliées. Il est ainsi possible de réaliser un recouvrement avec les armatures de la seconde phase. Il existe divers procédés utilisant des boîtes qui diffèrent par leur mode d'ouverture et leur matériau constitutif. Dans le cas de boîtes en acier il peut être admis d'en abandonner une partie dans le béton de première phase sous réserve de s'assurer que son enrobage est convenable et qu'elle ne compromet pas le bon fonctionnement du béton armé.



*Boîte d'attente.  
Dégagement des armatures.*

L'acier constituant les attentes doit pouvoir être déplié sans altération. L'aptitude au redressage après pliage est une caractéristique optionnelle spécifiée par les normes relatives aux aciers.

### 3.4.2 – Dispositifs de raboutage

---

Les dispositifs de raboutage permettent d'assurer la continuité des armatures grâce à une pièce intermédiaire appelée manchon. La liaison entre le manchon et les armatures est réalisée par filetage ou sertissage.



La fabrication des manchons eux-mêmes relève de l'industrie mécanique. Les procédés et la fabrication de ces manchons font l'objet d'une certification spécifique de l'AFCAB.

L'armaturier assure la préparation des armatures (coupe, filetage, façonnage éventuel). La mise en œuvre fait partie des opérations de pose en coffrage.

## 3.5 Pose en coffrage

La pose en coffrage des armatures est réalisée à partir d'armatures coupées façonnées ou à partir d'armatures assemblées (voir figure n° 6, paragraphe 3.2). Dans le premier cas elle inclut l'assemblage qui a été décrit au paragraphe 3.2.2.4. Quelle que soit la méthode adoptée, le bureau d'études joue encore ici un rôle primordial. En prenant en compte le processus de pose le concepteur de l'armature est en mesure de faciliter cette opération. Inversement, une armature parfaitement calculée peut s'avérer très difficile voire impossible à mettre en place si le processus de pose a été ignoré.





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**

<b>Normes et textes réglementaires applicables fin 2004</b>	<b>Nouvelles références normatives et réglementaires</b>
<p><b>NFA 35-015</b>: Armatures pour béton armé Ronds lisses soudables.</p> <p><b>NFA 35-016</b>: Armatures pour béton armé Barres et couronnes soudables à verrous de nuance FeE500 Treillis soudés constitués de ces armatures</p> <p><b>NFA 35-017</b>: Armatures pour béton armé Barres et fils machine non soudables à verrous.</p> <p><b>NFA 35-019-1</b>: Armatures pour béton armé Armatures constituées de fils soudables à empreintes Partie 1: Barres et couronnes.</p> <p><b>NFA 35-019-2</b>: Armatures pour béton armé Armatures constituées de fils soudables à empreintes Partie 2: Treillis soudés.</p> <p><b>NFA 35-020-1</b>: 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><b>NFA 35-021</b>: Aciers pour béton. Fils soudables utilisés pour la fabrication d'armatures pour béton.</p> <p><b>NFA 35-024</b>: Aciers pour béton. Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm.</p> <p><b>XP A 35-014</b>: Aciers pour béton armé Barres, fils machines et fils lisses en acier inoxydable.</p> <p><b>XP A 35-025</b>: 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><b>XP A 35-031</b>: Armatures pour béton armé Barres soudables à verrous de diamètre supérieur à 40 mm.</p> <p><b>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.</b></p>	<p><b>EN 10080</b> <b>Aciers pour l'armature du béton. Acier soudable pour béton armé. Généralités.</b> 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><b>NF EN 1992 (Eurocode 2)</b> <b>Calcul des structures en béton.</b> 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><b>NF EN 13369</b> <b>Règles communes pour les produits préfabriqués en béton</b> 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><b>Marchés publics de travaux.</b> <b>Cahier de clauses techniques générales</b> <b>Fascicule 65 A (août 2000)</b> 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><b>Marchés publics de travaux.</b> <b>Cahier de clauses techniques générales</b> <b>Fascicule 65 A (nouvelle version)</b> 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><b>NFP 18-201</b> (référence DTU 21) <b>Travaux de bâtiment</b> <b>Exécution des ouvrages en béton</b> <b>Cahier des clauses techniques.</b> Cette norme DTU concerne exclusivement l'exécution des travaux. Elle se réfère aux normes ci-dessus.</p>	<p><b>ENV 13670-1</b> <b>Exécution des ouvrages en béton</b> <b>Ce projet de norme européenne est l'équivalent de la norme NFP 18-201.</b> Il se réfère aux normes EN ci-dessus</p>

**Tableau n° 2 : armatures du béton**

<b>Normes et textes réglementaires applicables fin 2004</b>	<b>Nouvelles références normatives et réglementaires</b>
<p><b>Règles BAEL 91 révisées 99</b>  <b>Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.</b>                      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><b>NF EN 1992 (Eurocode 2)</b>  <b>Calcul des structures en béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour le bâtiment.</b>                      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><b>NFA 35-027 (janvier 2003)</b>  <b>Produits en acier pour béton armé. Armatures.</b>                      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><b>NFA 35-027 (nouvelle version)</b>  <b>Produits en acier pour béton armé. Armatures.</b>                      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><b>Marchés publics de travaux.</b>  <b>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.</b>                      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><b>Marchés publics de travaux.</b>  <b>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.</b>                      Ce texte dans sa nouvelle version sera en cohérence avec le nouveau contexte réglementaire.</p>
<p><b>NF P 06-013 Règles PS 92</b>  <b>Règles de construction parasismique et NF P 06-014 Règles PS MI 89/92: Construction parasismique des maisons individuelles et des bâtiments assimilés.</b>                      Ces règles contiennent les prescriptions complémentaires spécifiques aux constructions parasismiques, chacune dans son domaine d'application.</p>	<p><b>NF EN 1992 (Eurocode 2)</b>  <b>Partie 2: Ponts en béton armé et en béton précontraint</b>                      Ce texte donne les prescriptions complémentaires à la norme NF EN 1992 Partie 1-1 spécifiques pour le calcul des ponts.</p> <p><b>NF EN 1998 (Eurocode 8)</b>  <b>Calcul des structures pour leur résistance aux séismes, dans le cas de la construction de structures en béton dans des régions sismiques.</b>                      Ce texte donne les prescriptions complémentaires à la norme NF EN 1992 partie 1-1 aux constructions parasismiques</p>
<p><b>NF P 92-701</b>  <b>Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton.</b>                      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><b>NF EN 1992 (Eurocode 2)</b>  <b>Calcul des structures en béton. Partie 1-2: Calcul du comportement au feu.</b>                      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><b>NF P 18-201 (référence DTU 21)</b>  <b>Travaux de bâtiment. Exécution des ouvrages en béton. Cahier des clauses techniques.</b>                      Cette norme DTU concerne exclusivement l'exécution des travaux. Elle se réfère aux normes ci-dessus.</p>	<p><b>ENV 13670-1</b>  <b>Exécution des ouvrages en béton</b>                      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.

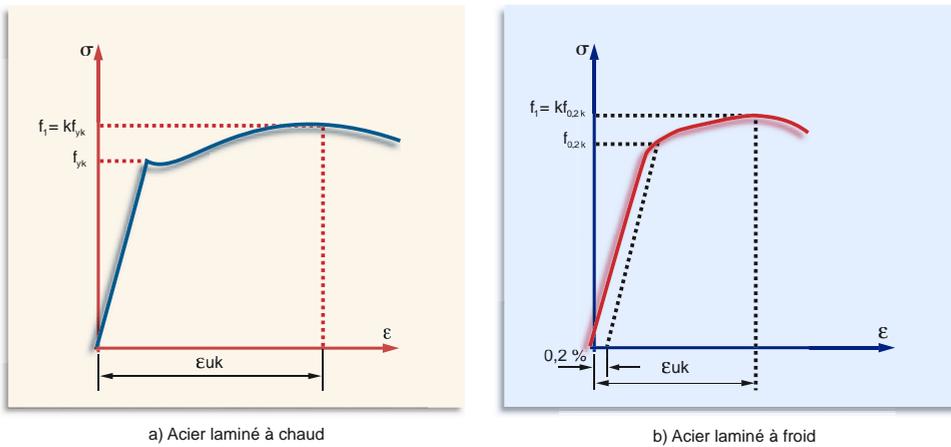
### 4.2.2 - Caractéristiques mécaniques en traction

---

#### *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
		A	B	C	A	B	C	
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, $\epsilon_{uk}$ (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 %
	$\leq 8$				$\pm 6,0$			
	$> 8$				$\pm 4,5$			

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**

<b>Diamètre nominal en mm</b>	<b>Barres</b>	<b>Couronnes et produits déroulé</b>	<b>Treillis soudés</b>	<b>Section nominale en mm<sup>2</sup></b>	<b>Masse linéique nominale en kg/m</b>
4,0		x		12,6	0,099
4,5		x		15,9	0,125
5,0		<b>XX</b>	x	19,6	0,154
5,5		x	x	23,8	0,187
6,0	<b>XX</b>	<b>XX</b>	x	28,3	0,222
6,5		x	x	33,2	0,260
7,0		<b>XX</b>	x	38,5	0,302
7,5		x	x	44,2	0,347
8,0	<b>XX</b>	<b>XX</b>	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	<b>XX</b>	<b>XX</b>	x	78,5	0,617
11,0		x	x	95,0	0,746
12,0	<b>XX</b>	<b>XX</b>	x	113,0	0,888
14,0	<b>XX</b>	<b>XX</b>	x	154,0	1,210
16,0	<b>XX</b>	<b>XX</b>	x	201,0	1,580
20,0	<b>XX</b>			314,0	2,470
25,0	<b>XX</b>			491,0	3,850
28,0	<b>XX</b>			616,0	4,830
32,0	<b>XX</b>			804,0	6,310
40,0	<b>XX</b>			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.

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

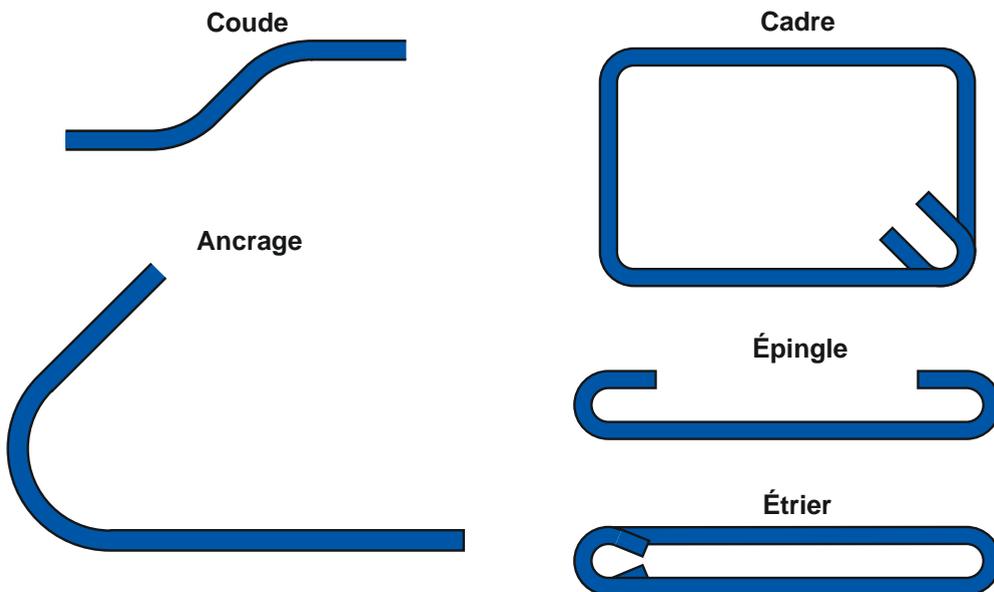
Le premier est le tableau 1 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003). Ce tableau reprend les prescriptions qui, jusqu'à 1990, étaient répétées dans chaque « fiche d'homologation » des aciers à haute adhérence. Ces fiches ont été ensuite remplacées par les certificats NF-AFCAB, (voir 4.4) qui ne comportent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

**Tableau n° 7: diamètres intérieurs de cintrage minimaux des aciers à haute adhérence selon la norme NF A 35-027**

<b>Diamètre nominal de l'acier</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>32</b>	<b>40</b>
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.

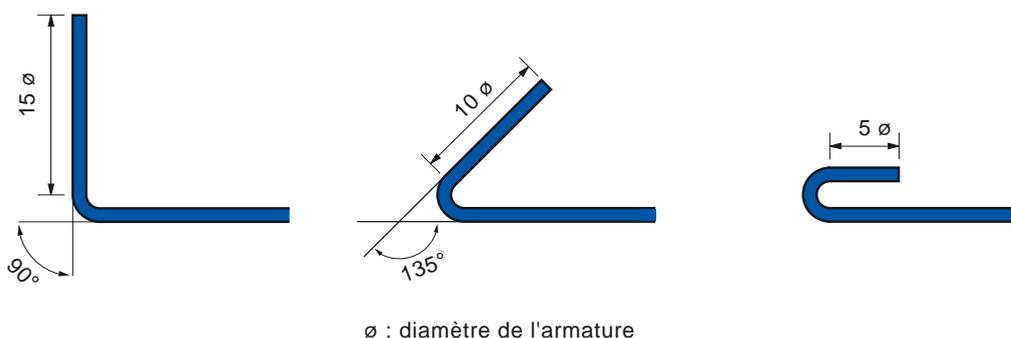
#### ■ 4.3.3.3 - Longueur des parties droites.

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

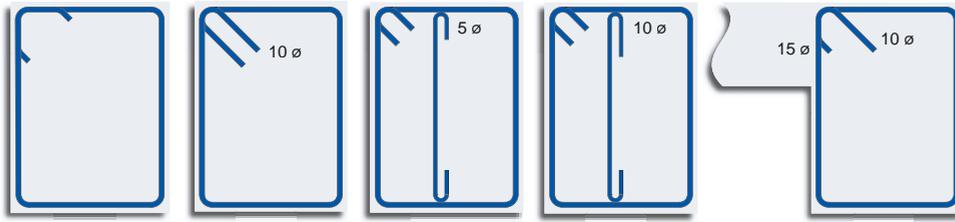
Dans les règles BAEL, les ancrages des cadres et étriers font l'objet de prescriptions particulières. Le paragraphe A.6.1,255 de ces règles indique trois solutions pour réaliser leurs ancrages d'extrémité avec une courbure suivant le rayon minimal (voir tableau 7). Ces ancrages représentés sur la figure 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°		

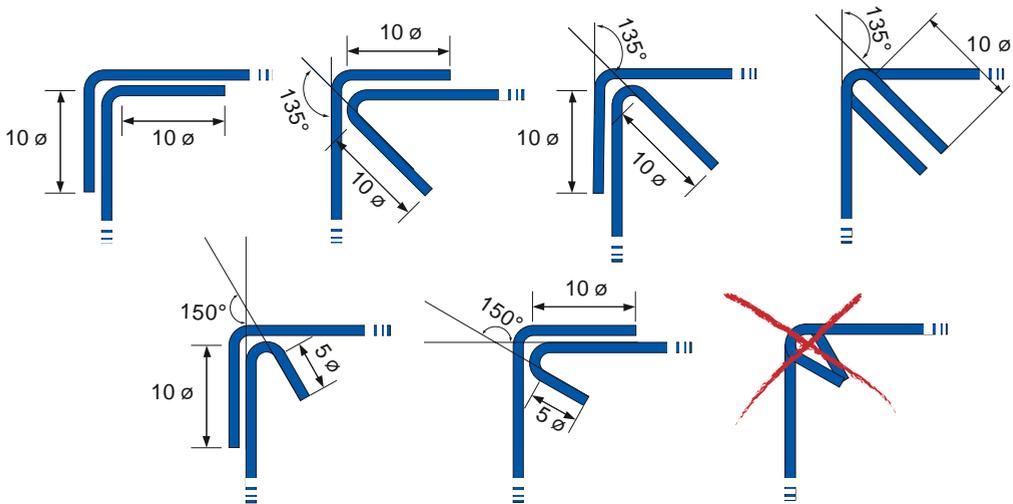
**Figure n° 15: armatures transversales. Comparaison d'ancrages conformes aux règles BAEL 91 et à l'Eurocode 2 Partie 1-1.**

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.

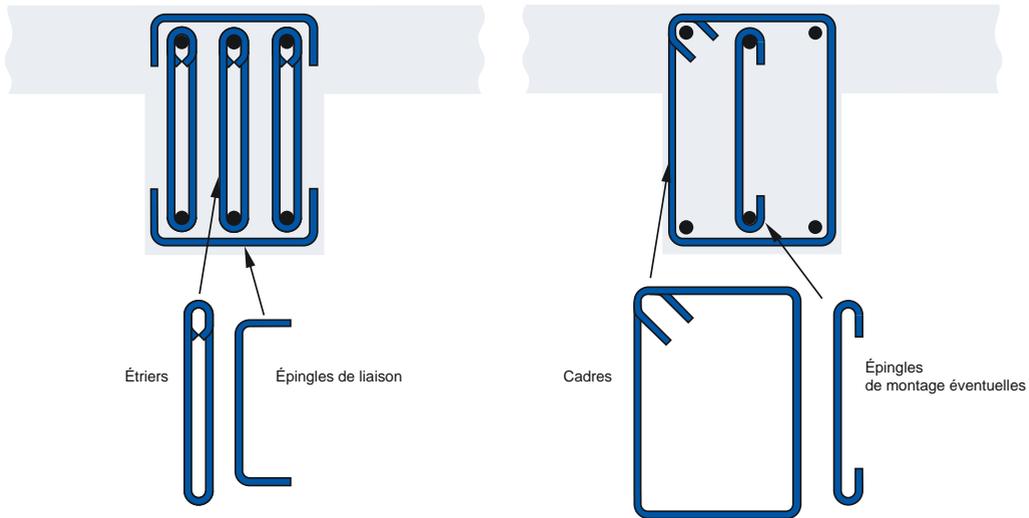


**Figure n°16: armatures transversales. Exemples de combinaisons d'ancrages conformes à l'Eurocode 2 Partie 1-1.**

#### ■ 4.3.3.5 - Tracé général des armatures d'effort tranchant

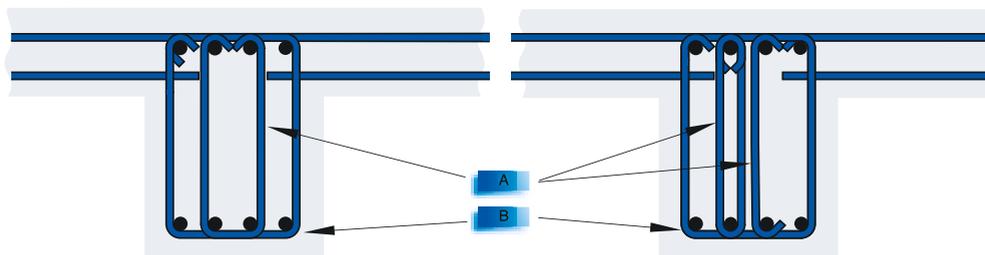
Le tracé, des cadres et des étriers fait aussi l'objet du paragraphe B.6.7, 1 des règles BAEL pour les poutres de bâtiments courants. Cet article prescrit que les cadres doivent suivre au plus près le contour des pièces. Il autorise aussi des files séparées d'étriers à condition de les relier par des 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 :

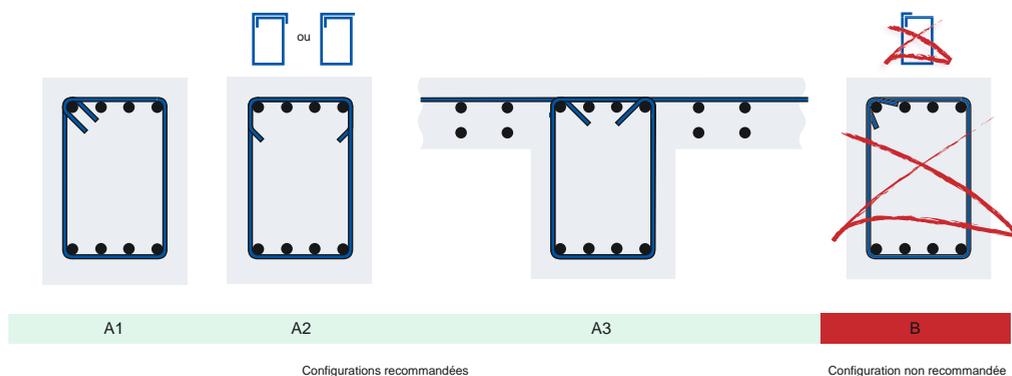
- cadres, étriers ou étriers entourant les armatures longitudinales tendues et la zone comprimée ;
- barres relevées ;
- cadres ouverts, échelles, étriers, etc., façonnés sans entourer les armatures longitudinales mais correctement ancrés dans les zones comprimées et tendues.

**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.

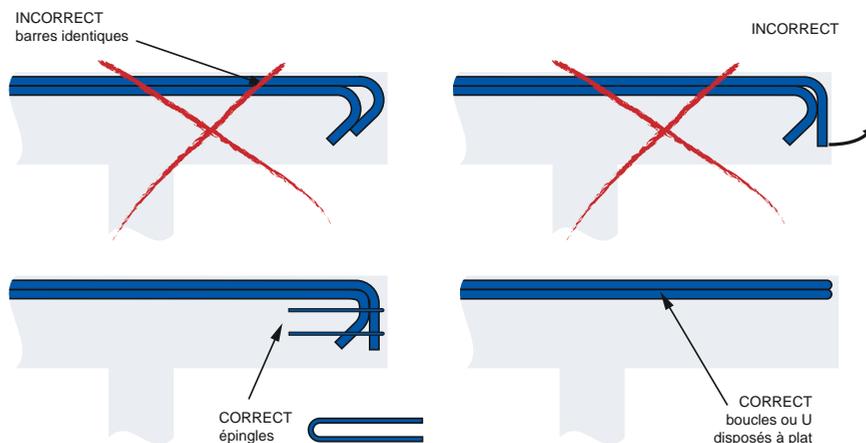
L'Eurocode 2 Partie 1-1 prescrit en 9.5.3 de maintenir les barres verticales placées dans les angles et celles placées à moins de 150 mm d'une barre tenue.

#### ■ 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.

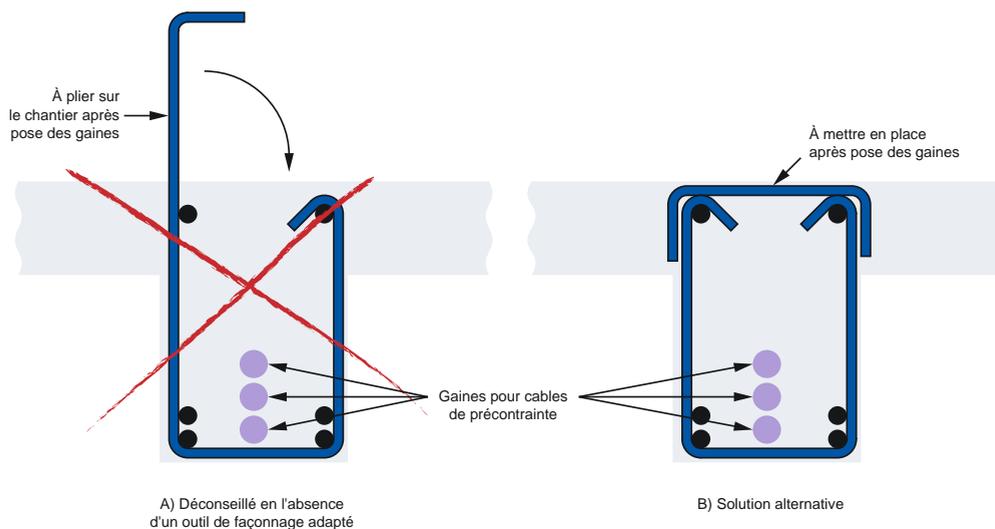
#### ■ 4.3.3.9 - Conditions générales de façonnage

L'article 5.2 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003) interdit de façonner à une température inférieure à  $-5\text{ °C}$ , et exige des précautions entre  $-5\text{ °C}$  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.



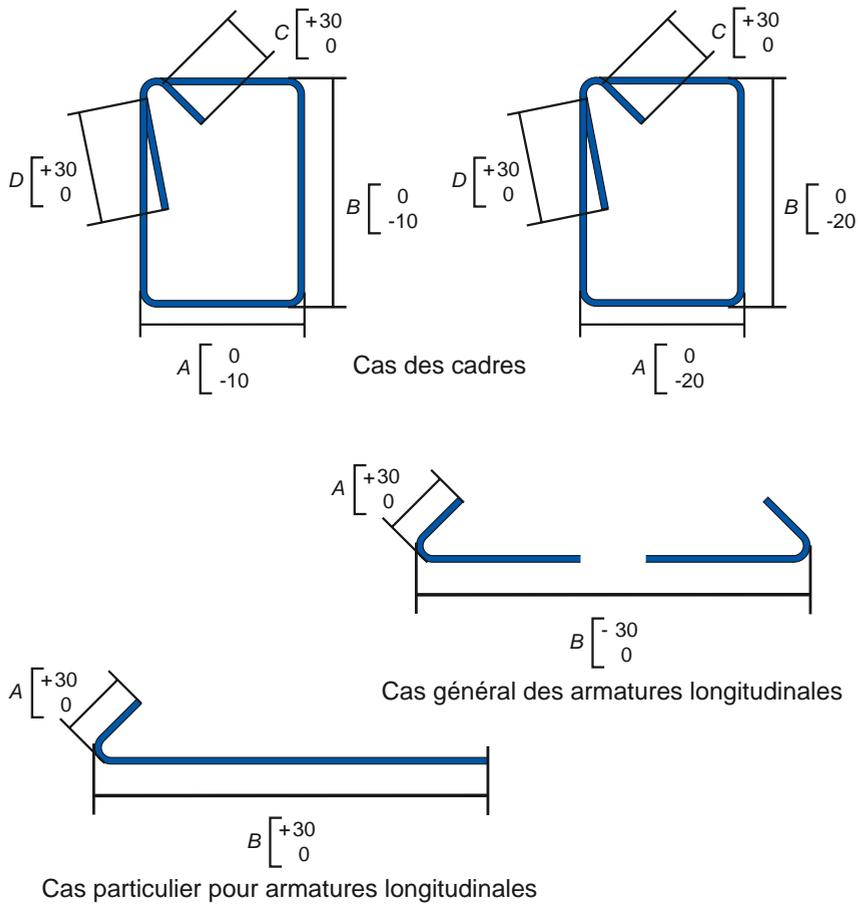
**Figure 21 : exemple de façonnage d'armatures dans le coffrage, cadres à fermer sur le chantier.**

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.

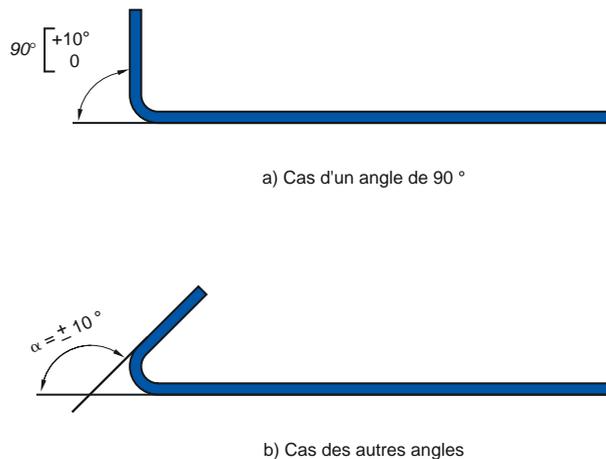
#### ■ 4.3.3.10 - Tolérances de façonnage

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.

<b>Caractéristiques</b>	<b>Type d'armature</b>	<b>Cotes de la figure</b>	<b>Écart en moins (en mm)</b>	<b>Écart en plus (en mm)</b>	
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.

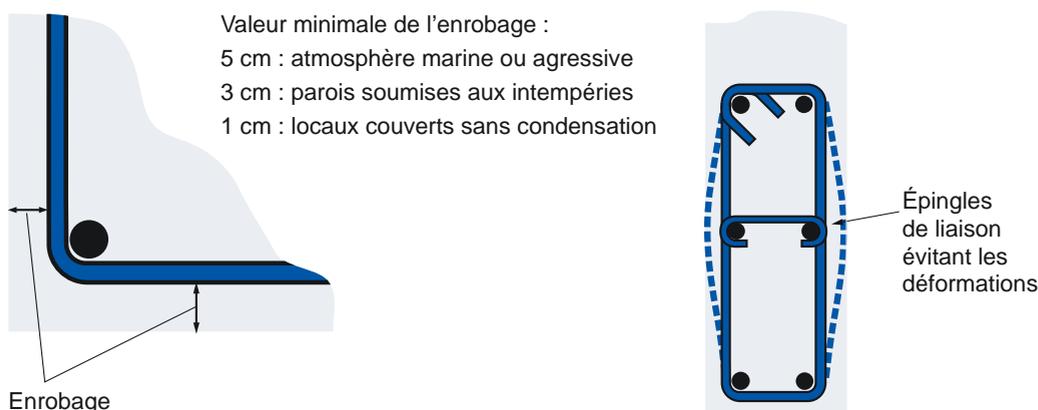
La carbonatation n'est pas nuisible au béton, mais elle entraîne une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu entourant les armatures qui

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).

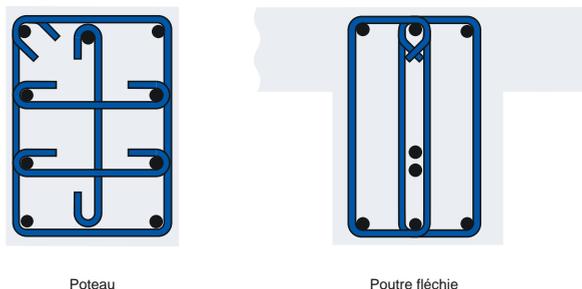
Vis-à-vis de la résistance au feu, le texte de référence dans la réglementation française à fin 2004, est le DTU « Règles de calcul : méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton » de décembre 1993. Le calcul fait intervenir la distance de l'axe de chaque armature 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 :

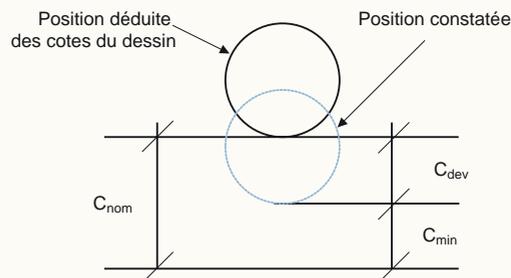
- en aucun cas, l'enrobage ne peut être inférieur à  $C_{\min}$  ;
- la tolérance  $\Delta_{(\text{plus})}$  dans la direction  $h$  (hauteur ou épaisseur de l'élément), où l'écart de l'armature diminue la résistance, est prise égale à :
  - pour  $h \leq 150$  mm  $\Delta_{(\text{plus})} = 10$  mm
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

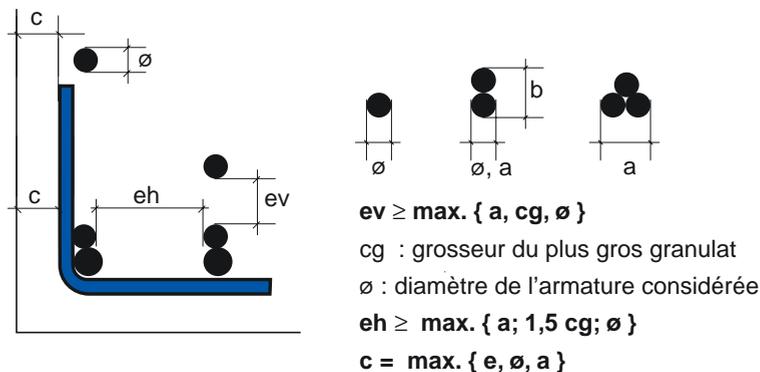
L'Eurocode 2 Partie 1-1 formule en 7.3.3 et 7.3.4 les prescriptions visant à maîtriser la fissuration. Elles sont plus précises que celles des règles BAEL et consistent à respecter, au choix, un diamètre maximal ou un espacement maximal des barres. Les valeurs limites dépendent de divers facteurs dont,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



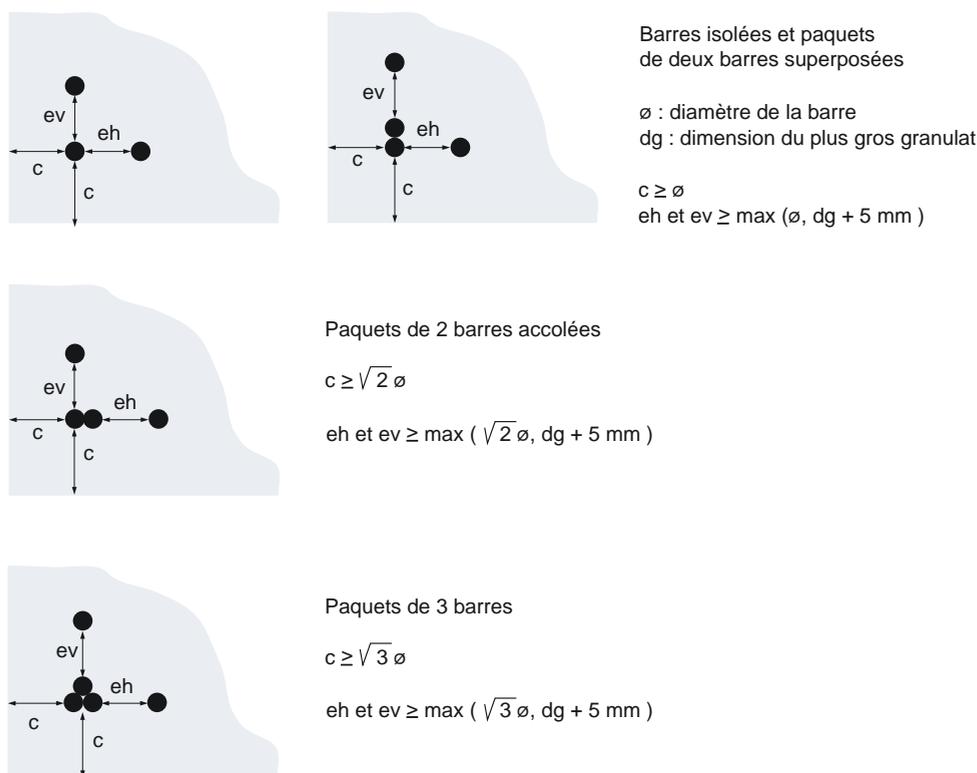
**Figure n° 28: distances minimales des armatures aux coffrages et entre elles permettant un bétonnage correct selon les règles BAEL 91.**

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**

---

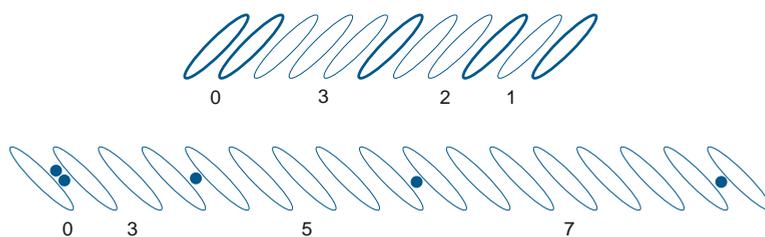
La certification NF - Aciers pour béton armé, gérée par l'AFCAB, garantit que les produits certifiés :

- 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](http://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.**

# Pour une armature parfaitement définie

**5.1 Repères et nombre d'armatures**

**5.2 Dimensions et angles de façonnage  
des armatures**

**5.3 Choix des mandrins de façonnage**

**5.4 Fermetures des cadres**

**5.5 Positions relatives des barres entre elles**

**5.6 Enrobage**

**5.7 Réservations**

**5.8 Armatures de formes « spéciales »**

Le chapitre précédent a été consacré à l'inventaire et à l'analyse des prescriptions qui s'imposent à tous. L'application de certaines d'entre elles nécessite de connaître la destination de l'ouvrage, ses conditions d'exposition aux intempéries, aux actions agressives et au feu, ainsi que la fonction de chaque armature.

Il est donc fondamental que l'armaturier dispose toujours de plans définissant complètement et sans ambiguïté les armatures qu'il doit exécuter. Pourtant, on constate malheureusement qu'il n'en est pas toujours ainsi et que certaines précisions font souvent défaut sur les plans.

Cette situation semble due au fait que l'armature par elle-même n'est pas un ouvrage ; elle n'est qu'un des composants du béton armé. Il n'existe donc pas de marché d'armature signé directement avec le maître d'ouvrage. L'armaturier est un sous-traitant de l'entreprise titulaire du lot « gros œuvre-maçonnerie ». Cette entreprise lui confie l'exécution et éventuellement la pose des armatures. Le bureau d'études peut être désigné par le maître d'ouvrage ou par l'entreprise de gros œuvre, mais il n'a jamais de lien contractuel avec l'armaturier.

Il arrive souvent que la mission du bureau d'études ne comporte pas explicitement la fourniture de plans d'armatures détaillés incluant des cahiers de ferrailage tels que définis dans la norme NF EN ISO 4066 (Dessins de bâtiment et génie civil-Cahiers de ferrailage).

C'est en particulier le cas des études de bâtiments publics relevant de la loi « MOP » (Maîtrise d'Ouvrage Publique). Le texte de cette loi énonce les définitions des différentes missions de maîtrise d'œuvre. Ces définitions n'ont pas été jugées suffisamment précises par les organisations professionnelles des bureaux d'études qui ont donc établi et publié un document (Décomposition des tâches de maîtrise d'œuvre) donnant le contenu des diverses missions. Celle confiée aux bureaux d'études intégrés à des équipes de maîtrise d'œuvre est en général la mission « plans d'exécution » et non la mission « plans d'atelier et de chantier ». Selon le document précité, les plans d'exécution sont « des plans à l'échelle 1/50 sur lesquels les seules précisions exigées sont : nature d'acier, sections d'armatures, implantation générale », alors que ce sont les plans d'atelier et de chantier qui doivent comporter les « nomenclatures, façonnages, calepinage, quantités à commander ». Ceci conduit les bureaux d'étude à inclure dans leurs plans des « NOTA » tels que celui reproduit dans l'encart ci-après.

En pratique, ces plans sont transmis tels quels par l'entrepreneur de gros œuvre à l'armaturier, alors qu'ils ne comportent pas toutes les précisions nécessaires à la définition et à la réalisation des armatures. Lorsque l'armaturier s'adresse au bureau d'études pour les obtenir, celui-ci répond parfois que sa mission se limite à l'établissement des plans qui ont déjà été communiqués.

## REPRODUCTION D'UN NOTA FIGURANT SUR UN PLAN DE BÂTIMENT RELEVANT DE LA LOI MOP

- > Les carnets d'armatures ne constituent pas des plans de coffrage. Pour toutes les cotes et les détails, il conviendra de se reporter aux plans de coffrage pour vérification.
- > L'entreprise de gros œuvre se doit de vérifier et d'établir, dans le cadre de ses plans atelier chantier (PAC), l'ensemble des indications relatives aux linéaires, longueurs des éléments (aciers), ainsi que toutes quantités à commander et autres calepinages ou nomenclatures
- > Les détails de façonnage des aciers de ce carnet ne sont en rien exhaustifs. L'entreprise pourra, selon sa méthodologie, prévoir ou adapter (par elle-même) d'autres détails de façonnage des aciers.

Elle vérifiera aussi les croisements entre les armatures des différents éléments (poteau-poutres par exemple) qu'elle adaptera (par elle-même) si elle le juge nécessaire. Toute modification fera l'objet d'un plan de détail qui devra être validé par le bureau d'études et le bureau de contrôle, avant toute exécution sur chantier.

L'exemple des missions relevant de la loi MOP est particulier. Cependant, quel que soit le cadre juridique des marchés, la prestation sous-traitée aux armaturiers n'inclut jamais une mission d'établissement de plans d'atelier ou de modification des plans d'armatures qu'il reçoit du bureau d'étude. Le règlement de l'AFCAB a partiellement pris en compte cette difficulté. Il demande aux armaturiers de signaler au bureau d'études les non-conformités qu'il relève sur les plans en regard :

- des incompatibilités de dimensionnement (par exemple, poutre de longueur 4 m, dessinée avec 25 cadres à espacement 20 cm, ou cote d'armature supérieure à celle du coffrage) ;
- des règles de façonnage ;
- des dimensions de retour de crosses et d'ancrages.

L'armaturier doit alors faire des propositions au bureau d'études qui reste le seul décideur en la matière.

**D'une façon générale, la définition complète d'un ensemble d'armatures doit comporter les précisions suivantes :**

- **un repère permettant d'identifier chaque armature ;**
- **le nombre de chaque armature coupée façonnée et le nombre d'éléments d'armatures assemblées correspondant à chaque repère ;**
- **les dimensions et les angles des armatures coupées façonnées ;**
- **les diamètres des mandrins de façonnage ;**
- **les positions relatives des armatures entre elles et par rapport au coffrage.**

## 5.1 Repères et nombre d'armatures

Lorsque l'armaturier travaille à partir de listes ou nomenclatures d'armatures (voir figure n° 7 au paragraphe 3.2.1) il ne rencontre aucun problème à ce sujet. En revanche, s'il reçoit uniquement des plans de ferrailage, il arrive que certaines armatures ne comportent pas d'indication de repère et de nombre.

Par exemple les chaînages sont prévus sous la forme globale :

- « Chaînage 4 diamètres 10, recouvrements 40 cm, cadres 15 x 15 diamètre 6 espacement 30 sur tous les murs ».

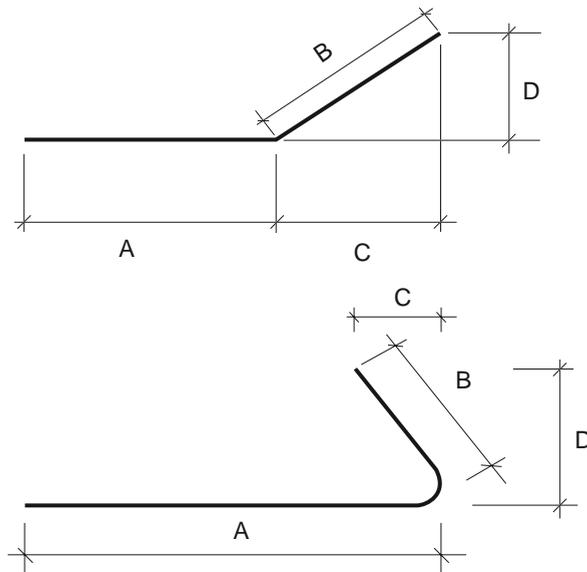
C'est donc alors l'armaturier qui doit calculer le nombre de pièces, en choisir la longueur... Ce travail nécessite de disposer des plans de coffrage, ce qui n'est pas toujours le cas, mais surtout, en tout état de cause, ce travail incombe normalement au bureau d'études.

## 5.2 Dimensions et angles de façonnage des armatures

Pour la plupart des armatures, les cotes sont bien précisées par les plans.

La lacune la plus fréquente concerne les façonnages comportant des angles autres que 90° ou 180° et en particulier les ancrages d'extrémité.

Pour définir une armature pliée à un angle différent de 90° ou 180° telle que celle représentée sur la figure n° 31, il faut donner par exemple la cote A et deux des trois cotes B, C, ou D. La longueur développée peut remplacer une des cotes. On peut aussi donner les cotes A, B, et un angle, malgré les prescriptions de la norme NF EN ISO 4066 qui ne retient pas les angles comme moyen de cotation utilisable.



**Figure n° 31 : cotation d'une armature à un seul pliage.**

## 5.2.1 - Cas particulier des ancrages

Les ancrages d'extrémité par courbure sont très utilisés. En France, l'ancrage par « retour à 135° » est depuis longtemps le plus répandu. La norme NF A 35-027 (janvier 2003) le cite d'ailleurs comme un des trois ancrages par courbure courants avec l'équerre et le crochet à 180°.

De ce fait, il est tacitement admis en France de choisir « par défaut », un angle de 135°, quand le dessin représente un angle aigu, et que seule la cote B est indiquée. En outre, la cote B n'est pas toujours précisée et dans ce cas, on adopte, également par défaut, la cote obtenue avec une longueur droite de dix diamètres après la courbure, qui est la longueur minimale fixée par la norme NF A 35-027 (janvier 2003) pour les fermetures de cadres. Cette pratique concerne en particulier les ancrages de fermetures des cadres. Les longueurs développées figurant sur les plans sont d'ailleurs en général calculées avec cette hypothèse.

Le manque d'information fréquemment constaté sur les plans dans la définition des ancrages a été pris en compte dans la norme NF A 35-027. Afin d'éviter aux armaturiers de devoir en permanence questionner les bureaux d'étude ou effectuer des choix qui ne relèvent pas de leur compétence, cette norme fixe, depuis son édition de janvier 2003, un mode de calcul des longueurs droites après courbure dans le cas où le plan ne les précise pas, mais où l'angle de façonnage est défini. Ces longueurs « par défaut d'indication » devraient donc se généraliser.

### Ancrage par courbure

Lorsque les longueurs rectilignes, après courbure d'un ancrage par courbure, ne sont pas mentionnées sur le plan, les longueurs rectilignes minimales après courbures ( $L_r$ ) à respecter sont données par la formule suivante :

$$L_r \geq (25 - \alpha/9) d$$

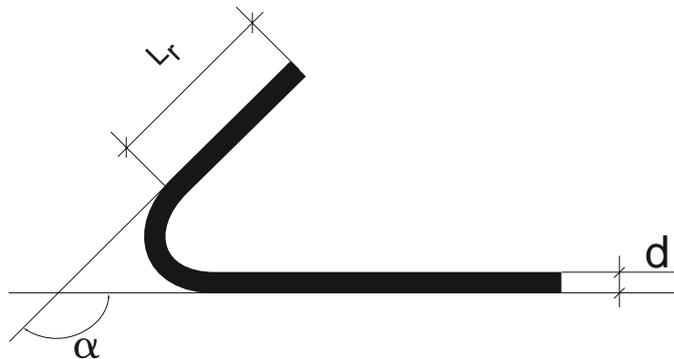
dans laquelle,

$\alpha$  représente l'angle de cintrage exprimé en degrés ;

et  $d$  le diamètre nominal de l'acier.

Cette formule n'est valide que pour les angles de cintrage compris entre 90° et 180°.

$L_r$  et  $d$  sont exprimés dans la même unité.



**Figure n° 32: ancrage par courbure – longueur minimale à respecter lorsque le plan ne la précise pas.**

Le chapitre 4 a présenté les changements relatifs aux ancrages des armatures transversales apportés par l'Eurocode 2 Partie 1-1 (voir les figures n° 15 et 16 au paragraphe 4.3.3.4).

En dehors du cas particulier des armatures transversales, l'Eurocode 2 Partie 1-1 demande que les ancrages soient déterminés par le calcul, en combinant les angles, les diamètres de mandrins et les longueurs droites.

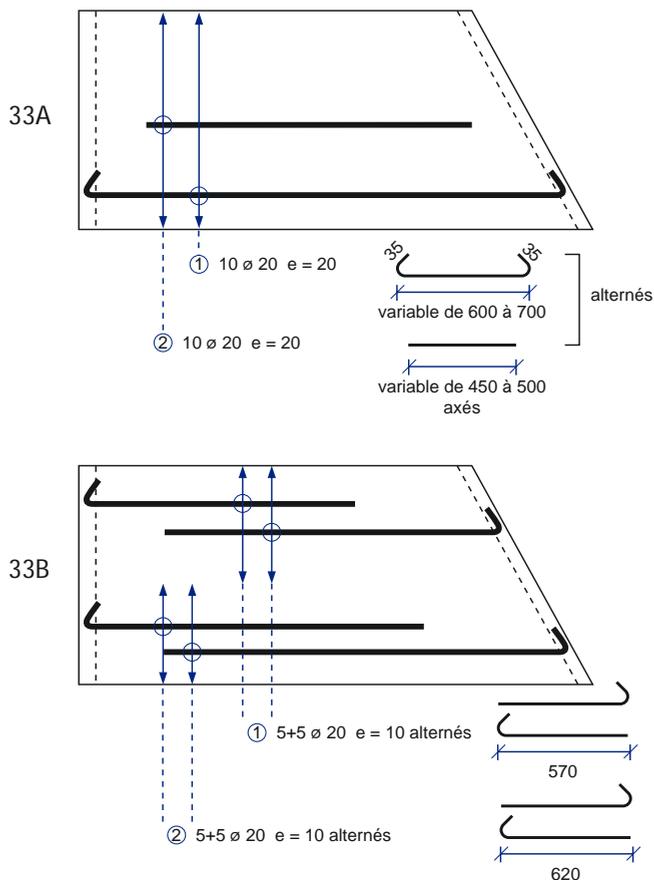
La mise en application de l'Eurocode rend donc impérative pour les bureaux d'études la nécessité de préciser les cotes, les diamètres de mandrins et les angles des armatures figurant sur leurs plans, y compris pour les ancrages.

Les plans comportent aussi quelquefois des armatures façonnées dont rien ne précise l'angle de façonnage, à moins de consulter les plans de coffrage alors que l'armaturier n'en dispose pas toujours. Il est pourtant évident qu'un pliage approximatif risque d'entraîner des difficultés à la mise en coffrage et des défauts d'enrobage. Si le diamètre de l'acier est important, une anomalie ne pourra pas être corrigée sur place.

## 5.2.2 - Armatures « variables »

Un autre cas où des précisions font souvent défaut est celui des armatures « variables ». Ce terme désigne des groupes d'armatures ayant toutes la même forme mais avec une ou plusieurs cote(s) différente(s).

La figure n° 33-A en illustre un exemple caractéristique. Elle représente le premier lit de la nappe inférieure du ferrailage d'une dalle de portée variable. Pour obtenir, par exemple, les longueurs de coupe et les cotes de façonnage des dix armatures différentes du repère 1, l'armaturier devra effectuer le calcul des longueurs de coupe et de façonnage en progression régulière à partir de la cote variant de 600 à 700 cm en progression arithmétique. Dans cet exemple, il est possible d'éviter d'avoir recours à des longueurs variables en utilisant des armatures « en tiroir » et en jouant sur les recouvrements (figure 33-B).



**Figure n° 33: exemple d'armatures « variables » et de solution alternative.**

Les armatures « variables » se rencontrent souvent sur des plans de poutres dont la section varie progressivement sur leur longueur. On peut sans doute comprendre que, dans ce cas le projeteur soit réticent à indiquer les cotes exactes de chaque cadre, si son programme informatique de dessin d'armatures ne comporte pas cette fonction. Cependant, il est évident que ces cotes sont nécessaires pour la fabrication. C'est bien au bureau d'études qu'il incombe de fournir ces éléments, d'autant plus qu'il possède certainement des moyens de calcul plus performants que ceux de l'armaturier, et que les dimensions inexactes ou approximatives entraîneront des difficultés de mise en œuvre et des défauts d'enrobage.

Sur les machines du type cadreuses, il est en général possible de programmer le façonnage de séries de cadres dont les dimensions varient en progression arithmétique. En revanche, ce n'est pas le cas pour les cadreuses sur lesquelles les armatures de gros diamètre sont façonnées. Chaque dimension différente nécessite alors le même travail de préparation et de réglage de machine qu'il corresponde à cent pièces ou à une seule. Dans certains cas, il n'est pas possible de procéder différemment. Cependant, on pourrait souvent adopter d'autres solutions en constituant des groupes d'armatures identiques et en jouant sur les longueurs de recouvrements (voir figure 33-B). Dans d'autres cas on pourra uniformiser les cotes d'encombrement tout en respectant les prescriptions réglementaires notamment celles visant les enrobages.

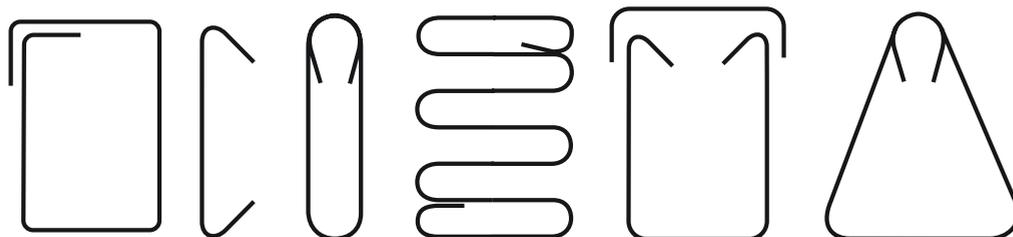
## 5.3 Choix des mandrins de façonnage

Dans le contexte réglementaire à fin 2004, les diamètres de mandrins sont en général déterminés par application du tableau 1 de la norme NF A 35-027 (janvier 2003). Souvent, ces diamètres ne sont pas précisés sur les plans. Parfois, le tableau des valeurs minimales figurant dans la norme est reproduit, ce qui signifie que l'armaturier doit choisir parmi les diamètres minimaux prévus pour les cadres, les ancrages, ou les coudes, alors que cette décision ne lui incombe pas. Dans la majorité des cas, ceci ne pose pas de problème, mais il existe cependant quelques exemples où des erreurs peuvent être commises. En effet, les définitions précises des termes « cadres », « étriers », « épingles », « ancrages par courbure » et surtout, « coudes » ne figurent pas dans les textes réglementaires et normatifs, et les croquis de la norme NF A 35-027 ne sont pas toujours suffisants. Ces définitions donnent donc lieu à des interprétations diverses.

Pour les éviter, nous pensons qu'on aurait dû préciser les définitions ci après.

**Cadre, étrier, épingle:** armature transversale assurant une des fonctions suivantes :

- résistance à des sollicitations tangentes,
- coutures de recouvrements,
- maintien au flambement de barres comprimées,
- maintien d'armatures soumises à une poussée au vide,
- frettage.



**Figure n° 34: armatures transversales, exemples de cadres, étriers et épingles.**

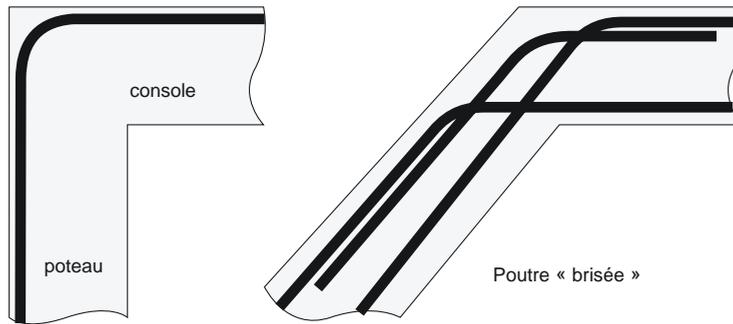
**Ancrage par courbure:** zone d'armature comportant un façonnage destiné à diminuer la longueur d'armature assurant la transmission des efforts par adhérence entre l'acier et le béton. Un ancrage par courbure est le plus souvent situé à une extrémité d'armature. Il peut cependant se trouver dans une partie intermédiaire, comme par exemple dans le cas des « boucles à plat » utilisées aux appuis des poutres.



**Figure n° 35: exemples d'ancrages par courbure.**

**Coude:** partie d'armature façonnée ne répondant pas à une des deux définitions précédentes.

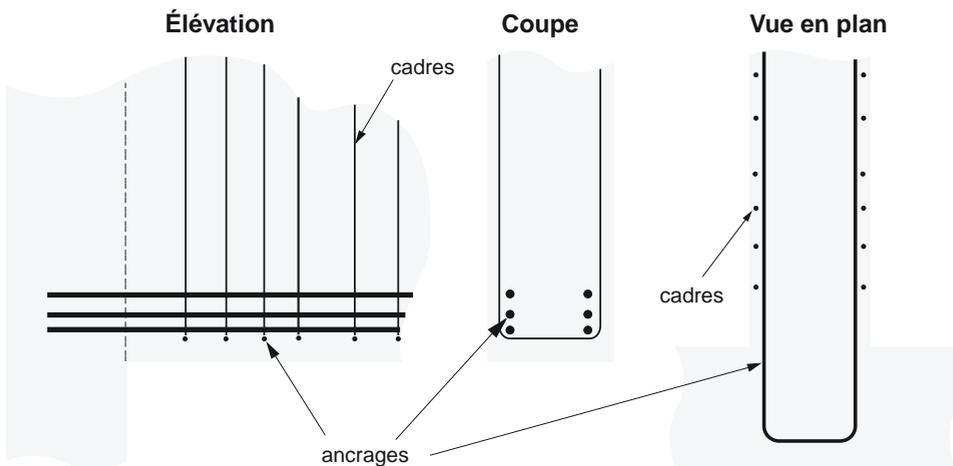
À partir de ces définitions on peut citer quelques exemples pour lesquels il est nécessaire d'analyser la fonction de l'armature pour effectuer le bon choix, ce qui relève de la compétence du bureau d'études et non de celle de l'armaturier.



**Figure n° 36: exemples de coudes.**

**Exemple 1 : parois fléchies**

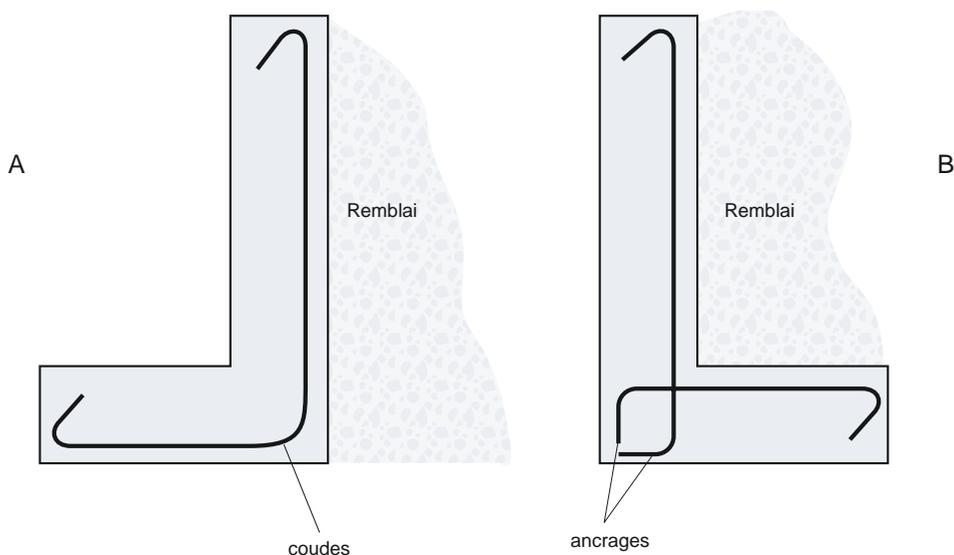
Dans une paroi fléchie, les armatures verticales sont des cadres. Elles pourront donc être façonnées avec les mandrins de petits diamètres figurant dans la première ligne du tableau 1 de la norme NF A 35-027 (voir le tableau n° 7 au paragraphe 4.3.3.1). En revanche, les armatures horizontales comportent des boucles à plat qui constituent les ancrages sur appuis, même s'il ne s'agit pas d'extrémités d'armatures. Elles devront donc être pliées sur les mandrins dont les diamètres sont indiqués dans la deuxième ligne du même tableau. Il appartient au bureau d'étude d'indiquer explicitement sur le plan le diamètre de mandrin à utiliser.



**Figure n° 37: paroi fléchie, cadres verticaux et ancrages des armatures horizontales.**

### Exemple 2 : mur de soutènement

La figure n° 38 représente les coupes schématiques de deux murs de soutènement. Ils diffèrent par la position de la semelle qui est située coté vide pour le mur « A » et coté remblai pour le mur « B ». Dans la forme « A », l'armature est continue entre mur et semelle. Il s'agit d'un coude. Dans la forme « B », l'armature du mur est dissociée de celle de la semelle. Les extrémités façonnées dans l'angle à la jonction entre le mur et sa semelle sont alors des ancrages. Ici encore les diamètres des mandrins doivent être précisés sur le plan.



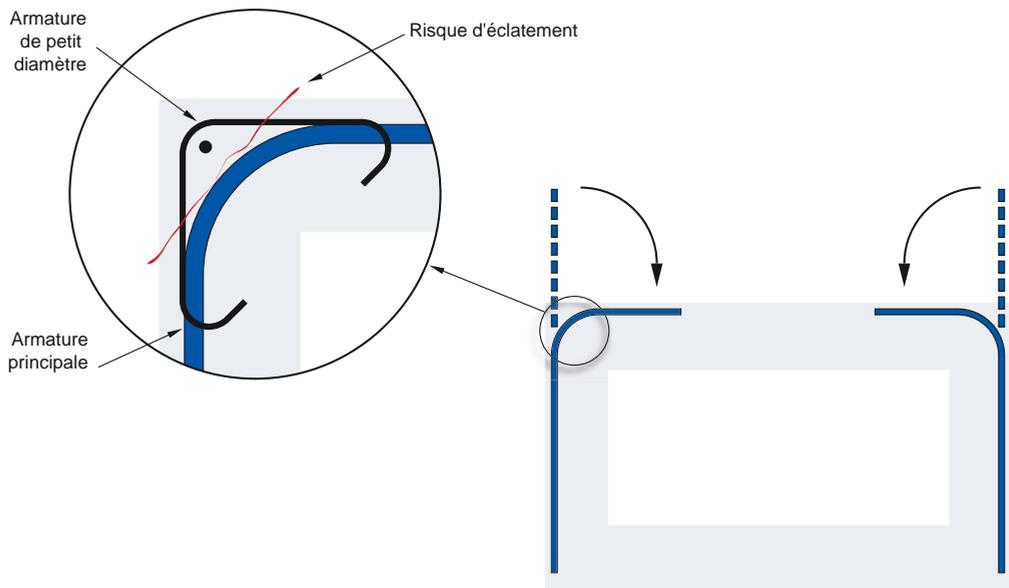
**Figure n° 38: exemple de coude et d'ancrage, murs de soutènement.**

### Exemple 3 : Pont-cadre ou portique

Le cas des armatures de pénétrations de ces ouvrages a été exposé au paragraphe 4.3.3.9. Ces armatures ne sont manifestement ni des cadres ni des ancrages, mais donc des coudes. Leur conformité est fondamentale car les efforts peuvent y atteindre des valeurs maximales sur toute la longueur de la partie cintrée. Les contraintes transmises au béton dans la partie cintrée sont alors élevées. Il s'agit d'ailleurs d'un cas, où la condition de non écrasement du béton (BAEL A.6.1 252) peut être prépondérante. Cette condition conduit parfois à des rayons de cintrage encore plus élevés, que l'armaturier n'a aucun moyen de déterminer sans la préconisation du bureau d'études.

Outre la difficulté que l'armaturier peut avoir à effectuer le bon choix, on peut noter que dans l'exemple 3, il s'agit souvent d'armatures de gros diamètre. L'adoption du diamètre de mandrin des coudes, plus élevé que celui initialement prévu a donc pour conséquence la création d'un « coin » de béton non armé dont

un dessin à l'échelle permet d'apprécier l'importance. Une étude de détail peut montrer la nécessité de prévoir quelques armatures complémentaires de petit diamètre.



**Figure n° 39: exemple de coude, pont cadre ou portique.**

L'Eurocode 2 mettra fin aux risques de choix de mandrins erronés que nous venons d'évoquer. En effet, comme indiqué au chapitre 4, ce règlement ne prescrit plus de diamètres de mandrins spécifiques et « forfaitaires » pour les ancrages et les coudes. Il demande dans tous les cas de calculer le diamètre nécessaire pour éviter l'écrasement du béton.

Cette règle oblige donc à une justification qui était rarement pratiquée dans le cadre des règles BAEL. Il est trop tôt pour savoir comment les bureaux d'études l'appliqueront. Il est souhaitable qu'une liste de diamètres préférentiels soit établie conjointement entre les bureaux d'études et les armaturiers. Il est aussi possible que l'expérience conduise à établir des valeurs forfaitaires analogues à celles de la norme NF A 35-027, afin d'éviter des calculs trop lourds.

Bien entendu, la nécessité de préciser sur les plans les diamètres de mandrins à utiliser reste impérative.

## 5.4 Fermetures des cadres

En toute rigueur, les plans pourraient préciser dans quel angle du cadre doit être réalisée la fermeture et quels sont les ancrages préconisés parmi les diverses solutions possibles présentées au chapitre 4. Cependant, en dehors de cas particuliers rencontrés, par exemple dans les constructions parasismiques, ces indications ne sont pas données. En effet un cadre fermé en utilisant l'un quelconque des ancrages conformes à ceux prescrits par les règles doit être considéré comme parfaitement continu.

C'est, semble-t-il, le seul cas où l'absence de précision sur les plans est souhaitable. Sauf raison particulière, il est préférable de laisser l'armaturier choisir parmi les solutions celle qui convient le mieux du point de vue de l'exécution et en particulier pour la mise en place des armatures longitudinales.

Une cotation convenable, complétée par une indication précise des diamètres de façonnage permet de définir complètement chaque armature élémentaire. Il reste maintenant à s'assurer de la position de ces différentes armatures entre elles et de l'ensemble par rapport au coffrage.

## 5.5 Positions relatives des barres entre elles

### 5.5.1 - Lits de barres superposés

---

Il arrive fréquemment dans les poutres comportant plus de deux lits d'armatures que l'espacement entre ces lits ne soit pas coté. Les armaturiers savent qu'ils ne doivent pas accoler plus de deux lits sauf indication contraire explicite, mais c'est au bureau d'études de préciser ceux qui peuvent être accolés et ceux qui doivent être séparés. Il lui appartient aussi de préciser les écartements en fonction des hypothèses de calcul qu'il a adoptées. Rappelons que la stabilité au feu peut nécessiter des positions d'armatures très spécifiques qui n'ont rien à voir avec celles adoptées dans le calcul des structures aux températures normales d'utilisation.

### 5.5.2 - Barres « flottantes »

---

Lorsqu'il est prévu des armatures telles que des barres relevées, ou des suspentes, il arrive fréquemment que leur position ne soit pas précisée sur les plans d'armatures. Seul le plan de coffrage que l'atelier d'armature ne possède pas toujours, permet de définir la position correcte de ces armatures.

## 5.6 Enrobage

L'enrobage n'est pas toujours précisé sur les plans. Il est souvent implicite que les cadres, lorsqu'il y en a, doivent être centrés dans la section béton, mais ceci n'est pas toujours le cas. De plus, il existe souvent d'autres armatures que les cadres tels que des épingles, des crosses, ou d'autres types de barres « indépendantes » dont l'enrobage, et même parfois la position, n'apparaissent pas.

Parfois, il peut y avoir ambiguïté entre :

- l'enrobage des cadres et celui des barres filantes.
- l'enrobage tel que défini par les règles BAEL et la « distance utile », parfois désignée sous le nom « d'enrobage à l'axe » utilisée par les Règles de calcul: « Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton ».

Comme indiqué au chapitre 4, l'Eurocode 2 Partie 1-1 prescrit explicitement de mentionner sur les plans l'enrobage nominal. Cette précision n'est donc plus un souhait mais une exigence réglementaire.

## 5.7 Réservations

On rencontre parfois sur les plans, des armatures qui traversent des réservations, sans qu'il soit possible de savoir s'il s'agit d'un choix délibéré (réservation provisoire à bétonner en seconde phase), ou d'une erreur à rectifier. Un nota sur le plan précisant ce point éviterait de se poser la question.

## 5.8 Armatures de formes « spéciales »

Certains ouvrages comportent des armatures de formes très particulières. C'est par exemple le cas lorsque la géométrie des coffrages est complexe pour des raisons architecturales, et que des armatures doivent être placées aussi près du parement que les règles d'enrobage le permettent.

Les outils de façonnage ne permettent pas de réaliser des courbes telles que des ellipses ou des hyperboles. Il faut alors que la forme de l'armature soit définie par une succession de parties droites et d'arcs de cercles la moins compliquée possible. Même dans ces conditions le bureau d'études doit s'assurer auprès de l'armaturier de la faisabilité des armatures qu'il détermine.

# Pour une armature plus simple, ou tout au moins réalisable

## **6.1 Fermeture des cadres**

## **6.2 Choix de la forme des armatures transversales des poutres**

## **6.3 Ancrages par crosses sur plusieurs lits**

## **6.4 Jonction entre chaînages de murs perpendiculaires**

## **6.5 Appui intermédiaire de poutre sur poteau**

## **6.6 Appui intermédiaire d'une poutre sur une autre poutre**

## **6.7 Poutre s'appuyant sur deux poutres porteuses**

## **6.8 Ouvrages spéciaux**

C'est une évidence : il ne suffit pas que les armatures soient conformes et définies, il faut aussi qu'elles soient réalisables telles qu'elles sont représentées sur les plans. Il est bien entendu moins indispensable, mais néanmoins très souhaitable, de rechercher une conception qui permette une exécution plus facile.

Nous avons vu au chapitre 3 que l'armature peut être :

- soit assemblée en usine, puis livrée sur le chantier. Dans ce cas, seuls quelques éléments ne sont pas montés, quand l'armaturier estime que la pose s'en trouvera facilitée ;
- soit livrée au chantier coupée, façonnée, puis assemblée sur le site, à proximité de l'ouvrage ou directement en coffrage.

Lorsqu'il s'agit d'armatures coupées façonnées exécutées à partir de listes d'armatures, l'atelier n'a aucune indication sur la disposition de l'ensemble. C'est l'entreprise assurant la pose en coffrage qui risque de rencontrer les difficultés de mise en place. Il lui appartient donc de communiquer ses instructions à l'armaturier.

Dans le cas d'armatures assemblées et exécutées à partir de plans complets (plans de ferrailage et plans de coffrage), le choix des pièces assemblées et des éléments laissés non montés est déterminant pour la facilité et éventuellement pour la possibilité de mise en place sur le chantier.

Ce choix fait pleinement partie du « métier » de l'armaturier, mais, en théorie, son intervention ne devrait pas aller au-delà. En fait, lors de l'étude du montage et des conditions de pose, il arrive assez fréquemment de constater que l'armature prévue n'est pas réalisable sans modification.

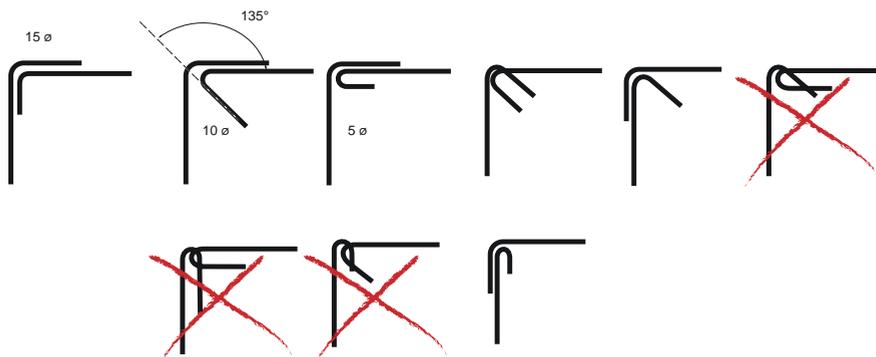
Lorsque l'armaturier décèle ce type de problème lors de l'analyse des plans il doit le signaler au bureau d'études. Ce dernier conserve dans tous les cas le pouvoir de décision. L'armaturier peut uniquement exposer les difficultés qu'il rencontre et formuler des propositions qui permettraient de les résoudre.

Les cas trop évidents de dimensions d'armatures manifestement incompatibles entre elles, ou avec celles du coffrage, ou du nombre de pièces erronés ne seront pas développés ici, mais on peut citer quelques exemples moins visibles, et cependant courants ou représentatifs, qui peuvent être rencontrés à deux stades de l'exécution :

- lors du montage d'éléments d'armatures dans une cage prévue assemblée en usine ou sur site ;
- lors de la pose de cages assemblées s'interpénétrant avec d'autres armatures.

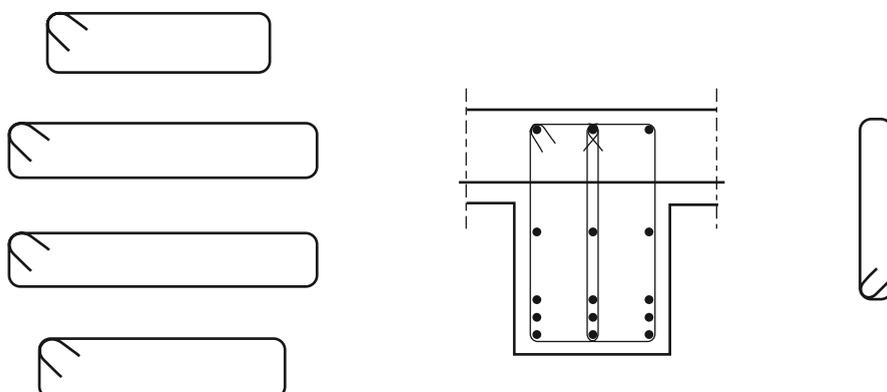
# 6.1 Fermeture des cadres

Le chapitre 4 a présenté les prescriptions relatives aux ancrages de fermeture des cadres applicables à fin 2004 (voir 4.3.3.3). En utilisant simplement les ancrages avec des angles de pliage de  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  et  $180^\circ$ , ces prescriptions permettent neuf formes de fermetures théoriques. Six d'entre elles sont pratiquement utilisables, mais on constate que la fermeture avec deux crochets à  $135^\circ$  est devenue largement prépondérante sur les plans.



**Figure n° 40: fermeture des cadres, combinaisons possibles selon les règles BAEL.**

Les cadres sont presque toujours figurés sur les plans par des schémas tels que ceux de la figure n° 41.



**Figure n° 41: fermeture des cadres, exemples de représentation courante.**

Il est certain que, dans la plupart des cas, cette représentation est « symbolique ». Elle ne signifie pas forcément que le bureau d'études impose une fermeture par crochet à 135°. Il s'agit d'une habitude de dessin qui a maintenant été intégrée dans la plupart des logiciels de dessin d'armatures, et qui semble avoir plusieurs origines :

- il est exigé sur certains chantiers que les cadres soient fermés de cette manière. Cette exigence est abusive, puisque les règles BAEL considèrent les autres fermetures comme équivalentes ;
- les règles relatives aux constructions parasismiques imposent de prévoir ainsi les fermetures dans certaines parties de ces ouvrages. Il n'est pas pour autant nécessaire d'appliquer cette disposition pour les constructions courantes. Si l'objectif est d'améliorer la sécurité de ces bâtiments au-delà de ce que les règles imposent, bien d'autres dispositions seraient à retenir avant de penser à la fermeture des cadres.

Beaucoup d'armaturiers français ont donc choisi de réaliser systématiquement les cadres avec des fermetures par crochets à 135° suivis d'une longueur droite de dix diamètres. Ils préfèrent éviter ainsi des refus de leurs clients. D'autre part, les longueurs développées figurant sur les plans sont en général calculées avec cette hypothèse, alors que les ancrages à 90° exigeraient une longueur légèrement supérieure.

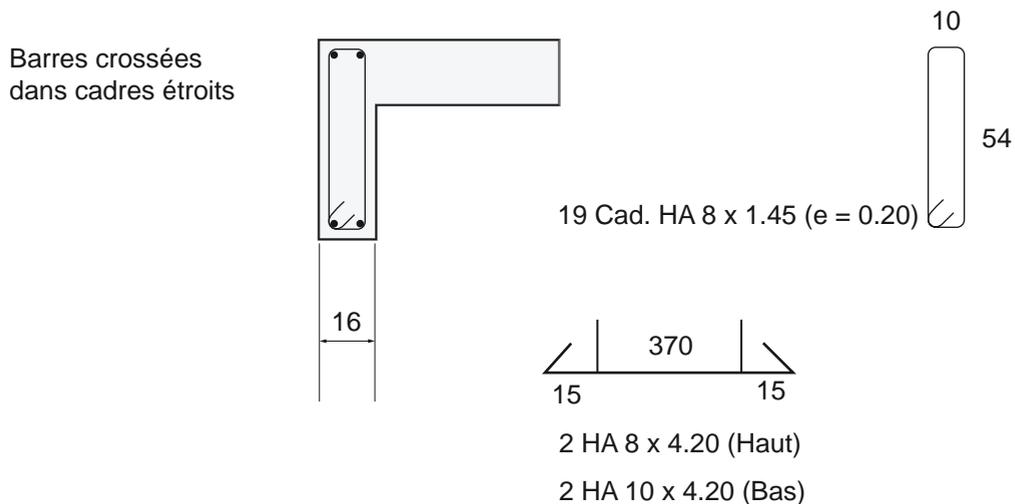
Ce type d'ancrage n'est pratiquement jamais utilisé dans les autres pays mais reste de loin le plus courant en France. Cette particularité nationale, est actuellement à l'origine de fréquentes difficultés de montage des armatures. Les quelques exemples suivants illustrent ces difficultés et proposent des solutions alternatives permettant au contraire de faciliter l'assemblage.

Ces solutions, prennent en compte les modifications apportées par l'Eurocode 2 (voir figure 16), tout en remarquant que les dispositions restent inchangées pour les crochets à 135°.

### ***Exemple 1 : mise en place des barres longitudinales***

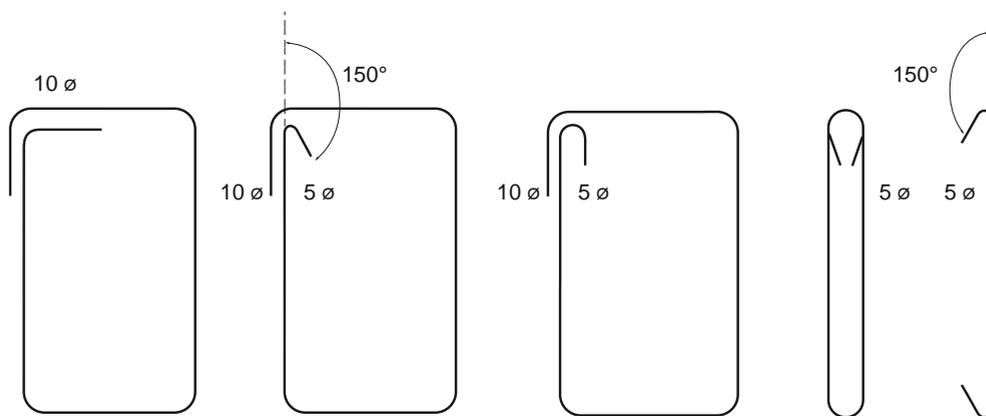
Le mode de fabrication le plus courant consiste à produire d'une part les cadres sur des machines automatiques, d'autre part les barres longitudinales, façonnées ou non, sur des machines différentes, puis à assembler les cages à l'aide de soudures en atelier ou de ligatures sur chantier.

Quelle que soit la technique utilisée pour positionner les armatures longitudinales dans les cadres, la figure n° 42 montre que cette opération sera difficile pour les barres situées dans l'angle comportant la fermeture. Dans le cas de cadres étroits et de barres de gros diamètre, on peut même arriver à une impossibilité.



**Figure n° 42: fermeture des cadres, difficulté de mise en place des armatures longitudinales.**

La difficulté disparaît complètement si on utilise une fermeture avec deux ancrages à 90° (avec longueur droite de dix diamètres comme le prescrit l'Eurocode 2). La solution avec un ancrage à 90° et un à 150° (avec longueur droite de 5 diamètres) est aussi acceptable.

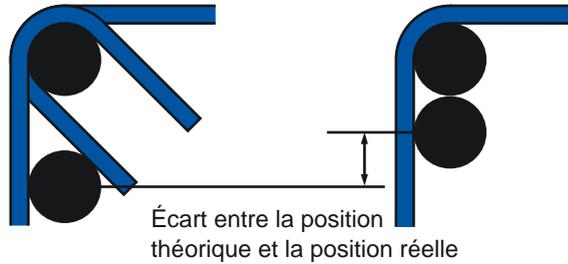


**Figure n° 43: fermeture des cadres, modes de fermeture facilitant la mise en place des armatures longitudinales.**

### **Exemple 2 : lits de barres superposées dans une poutre**

Dans le cas de lits superposés de gros diamètre, les crochets obligent à décaler les barres avec une perte sensible de hauteur utile par rapport aux hypothèses de calcul. Pour des poutres de faible hauteur l'écart relatif devient important et peut être très préjudiciable au bon comportement de la poutre.

Ici encore les deux modes de fermeture représentés sur la figure n° 45 suppriment ce défaut.

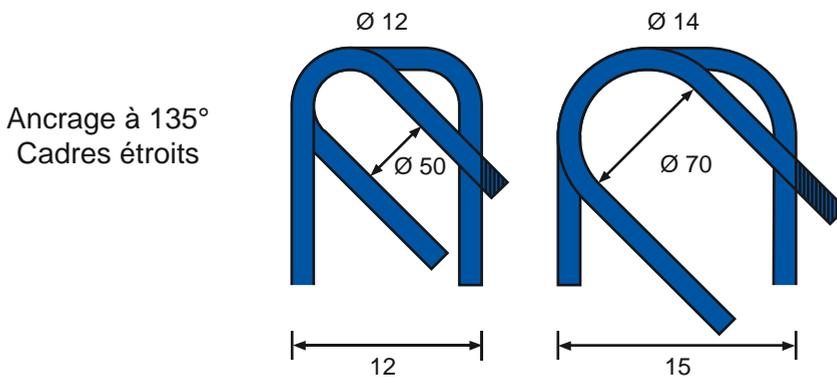


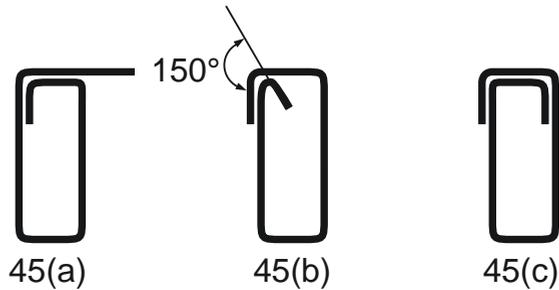
**Figure n° 44: fermeture des cadres, difficulté de mise en place de barres superposées.**

**Exemple 3 : cadres de petites dimensions**

Pour des cadres de petites dimensions tels que ceux représentés sur la figure n° 45, la longueur droite de cinq diamètres entre courbures prévue par la norme NF A 35-027 n'est pas respectée et surtout, l'enrobage de la partie hachurée risque d'être insuffisant.

L'adoption de fermetures à 90° conduisait à des impossibilités compte tenu de la longueur droite de quinze diamètres exigée par les règles BAEL (figure 45-a). La réduction de cette longueur par l'Eurocode 2 à dix diamètres évite dans la plupart des cas ces difficultés. En cas de nécessité, on pourra adopter un crochet à 90° pour un des brins et un crochet à 135° pour l'autre (figure 45-b). On peut aussi réaliser une seconde équerre sur le brin horizontal (figure 45-c).



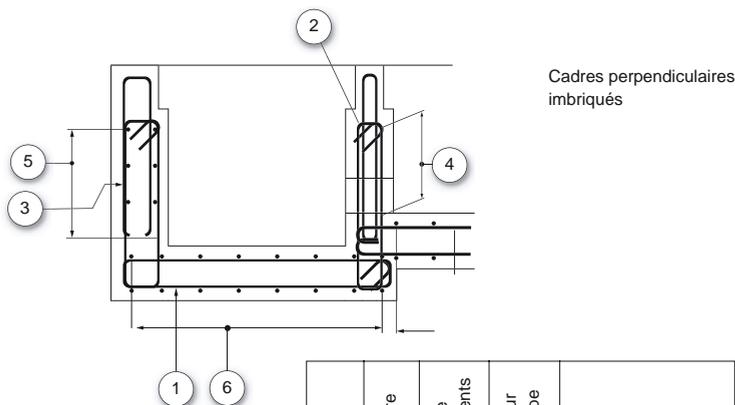


**Figure n° 45: fermeture des cadres, cadres de petite dimension.**

Ces difficultés, alliées à une petite recherche d'économie, conduisent d'ailleurs à raccourcir la longueur droite après courbure au mépris des exigences prescrites aussi bien par les règles BAEL que par l'Eurocode 2.

**Exemple 4: imbrication de cadres perpendiculaires**

Dans cet exemple, il ne s'agit pas de placer des barres longitudinales mais d'engager les cadres 5 dans les cadres 3 placés dans des plans perpendiculaires. Dans la zone des crochets de fermeture, la tâche apparaît pour le moins ardue.



repère	diamètre	nombre d'éléments	longueur de coupe	schéma
1	M=1 14 HA	16 e=0,20	3,46	0,17
2	M=1 14 HA	16 e=0,20	2,48	0,15
3	M=1 14 HA	3 x 1 e=0,20	2,58	0,20
4	M=1 12 HA	4 x 1 e=0,20	6,28	0,12
5	M=1 14 HA	4 x 1 e=0,20	6,42	0,17
6	M=1 14 HA	8 e=0,20	6,48	0,20

**Figure n° 46: fermeture des cadres, difficulté de montage de cadres imbriqués.**

Dans ce cas, la faisabilité du montage nécessite l'adoption d'ancrages à 90°.

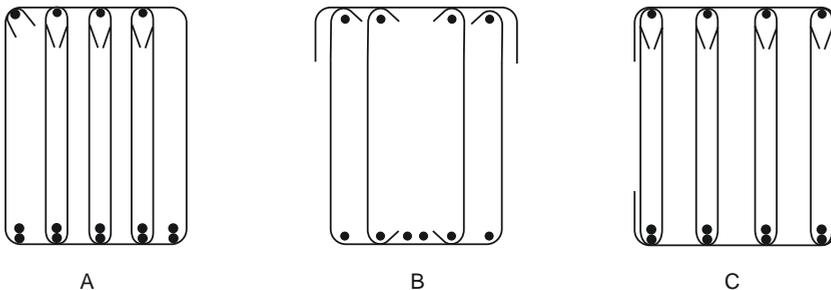
Lorsqu'un armaturier reçoit des plans comportant des dispositions telles que celles que nous avons présentées à titre « d'exemples à ne pas suivre », la préparation de la production se trouve bloquée, puisqu'il n'est pas habilité à modifier les plans sans l'accord du bureau d'études. Il ne peut que proposer d'adopter des fermetures autres que les crochets à 135° causes du problème.

Pour éviter ce blocage, il suffirait de convenir entre bureaux d'études et armaturiers de la règle suivante :

« Sauf mention contraire figurant sur les plans, conformément à l'Eurocode 2, les cadres seront fermés par des ancrages à 90° avec une longueur droite de 10 diamètres après la courbure, et les épinglets seront ancrés par des crochets à 150° avec une longueur droite à 5 diamètres après la courbure. »

## 6.2 Choix de la forme des armatures transversales des poutres

La forme choisie pour les armatures transversales par les bureaux d'études français (ou par les logiciels qu'ils utilisent) comporte presque toujours un cadre fermé et un ou plusieurs étriers comme représenté sur la figure n°47A. En examinant des plans dessinés dans d'autres pays, on rencontre en général des formes très différentes telles que celles des figures n°47B ou C.



**Figure n° 47: formes diverses d'armatures transversales.**

Il ne faut pas en conclure qu'il faille complètement changer nos habitudes. En revanche il est intéressant de comparer les avantages et les inconvénients des diverses solutions.

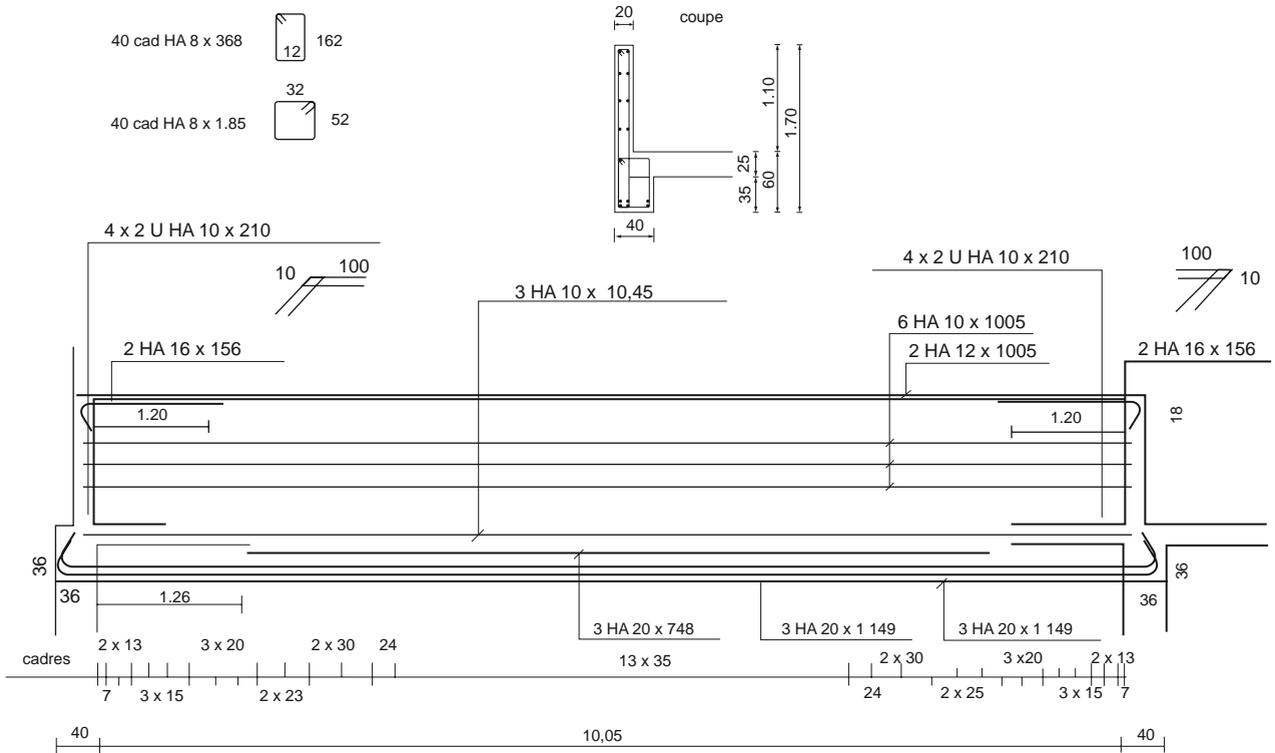
- Forme A :
  - elle est économe en poids d'acier;
  - elle assure une bonne rigidité de la cage assemblée;
  - l'introduction des barres longitudinales dans les étriers n'est pas toujours facile.
- Forme B :
  - elle consomme d'avantage d'acier si l'on prévoit effectivement l'épingle repérée « E » sur la figure. Cependant dans le cas des poutres « en T », la présence des armatures de la dalle permet de s'en dispenser, si les cadres ouverts sont assez rigides;
  - la mise en place des barres longitudinales est facilitée à la fois par le cadre ouvert et par le remplacement des étriers par des épingles.
- Forme C :
  - dans une poutre de grande section cette forme peut faciliter l'assemblage en usine de chaque file séparée et diminuer les volumes des cages d'armatures pour le transport.

En fait, le choix doit s'effectuer en concertation entre le bureau d'études, le fabricant des armatures et l'entreprise assurant leur pose en coffrage.

## 6.3 Ancrages par crosses sur plusieurs lits

La représentation reproduite sur la figure n° 48 est très fréquente. Si, comme le prévoit le plan, on réalise des façonnages identiques pour les deux lits, il n'est matériellement pas possible de les superposer. Il est physiquement possible de les accoler, mais cette disposition est déconseillée par les règles BAEL et l'Eurocode 2 car elle est nuisible à la bonne mise en place du béton. En inclinant le plan d'une des crosses, on ne résout le problème que dans le cas de crosses de petit diamètre.

Il s'agit du même problème que celui évoqué au paragraphe 4.3.3.8 pour les armatures supérieures des consoles. Il peut se résoudre de façon analogue.

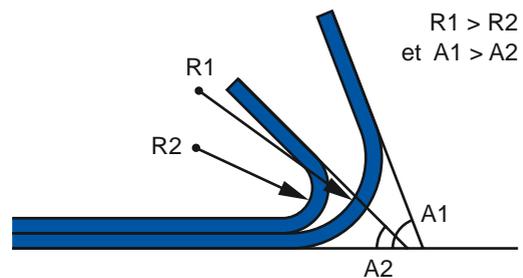


**Figure n° 48: barres croisées sur plusieurs lits  
difficultés de respect du plan.**

Une première solution consiste à modifier le façonnage des ancrages :

- utiliser pour les armatures du lit inférieur un mandrin de façonnage d'un diamètre supérieur au minimum résultant du calcul ;
- adopter des angles de façonnage différents pour chacun des deux lits d'armatures (figure n° 49).

Cette solution modifie les conditions d'ancrage sur appui. L'armaturier ne peut donc pas l'adopter sans l'accord du bureau d'études.



**Figure n° 49: barres croisées sur plusieurs lits, solution acceptable.**

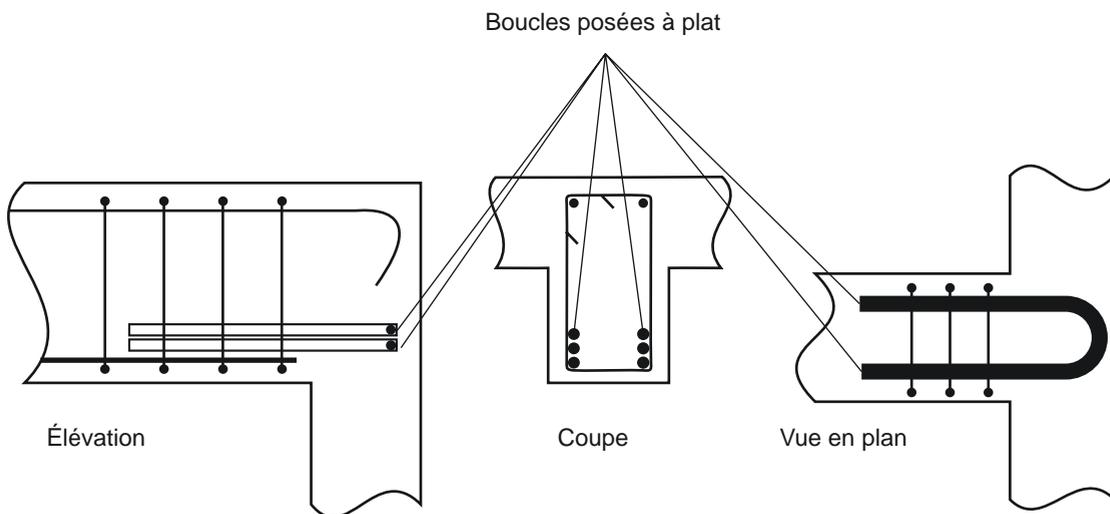
Une seconde solution consiste à prévoir sur les plans d'autres ancrages que les habituelles croixes à 135°. En particulier des armatures en forme de « U » indépendantes peuvent être disposées en adoptant un recouvrement convenable (en général 50 diamètres) avec des barres inférieures droites. Suivant la largeur de la poutre, on peut les façonner, avec deux plis ou avec un seul sur un mandrin de plus gros diamètre comme le montre la figure n° 50.

Ces armatures d'ancrage présentent plusieurs avantages :

- leur ancrage est « total » ;
- elles peuvent être très précisément réglées à la position convenable ;
- elles sont en général éloignées des parements du béton ce qui facilite le respect de la condition de non-écrasement du béton ;
- elles peuvent être superposées, en respectant les mêmes règles que pour les barres longitudinales.

La « boucle normale » est d'ailleurs une des méthodes d'ancrage citées par l'Eurocode 2 en 8.4.1.

Il faut, en revanche, s'assurer que leur mise en place n'est pas gênée par la présence de barres verticales.

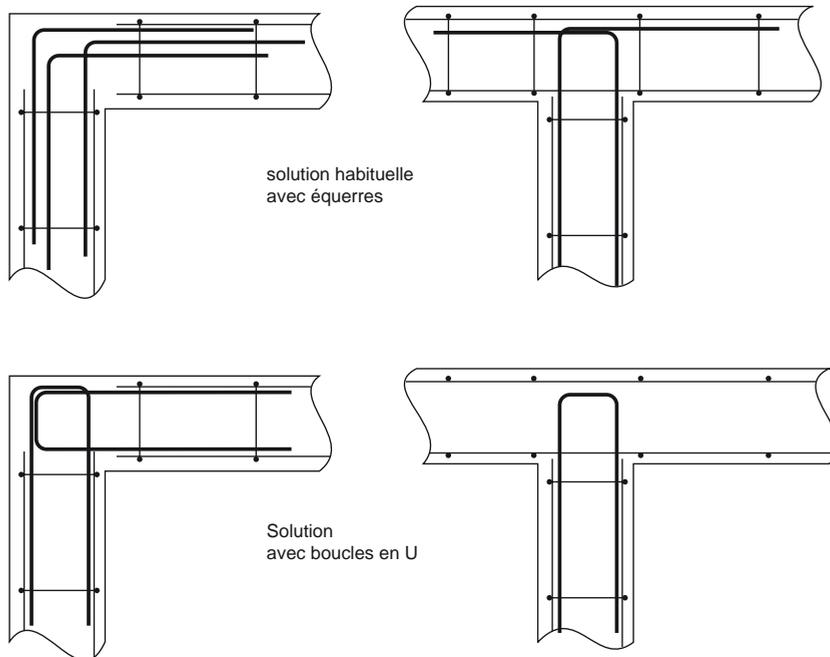


**Figure n° 50: ancrage d'appui de poutre utilisation de « boucles à plat ».**

## 6.4 Jonction entre chaînages de murs perpendiculaires

La solution la plus utilisée pour assurer la continuité des armatures longitudinales dans les angles de bâtiments est celle des équerres de liaison comportant des recouvrements droits de 50 diamètres avec les chaînages courants. L'introduction de ces équerres dans les cadres des éléments assemblés sera difficile. Le poseur sera tenté de les placer hors des cadres, au risque de ne pas respecter les enrobages prévus.

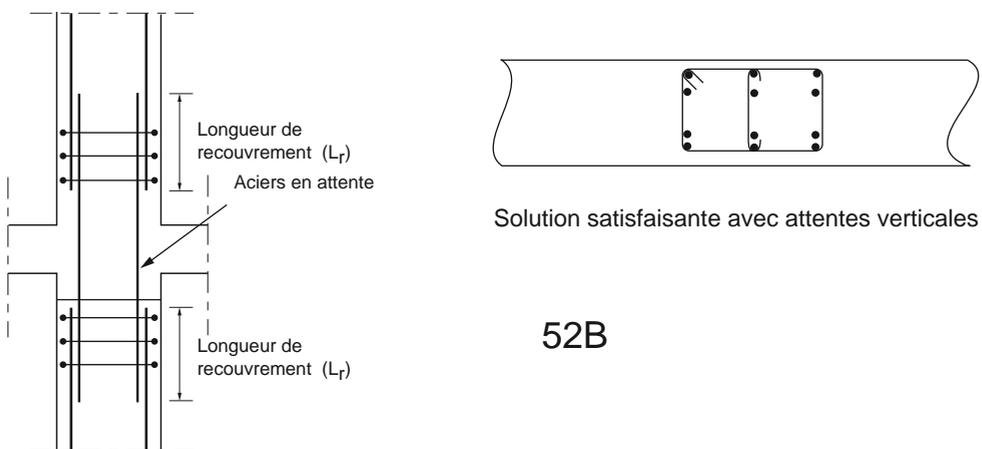
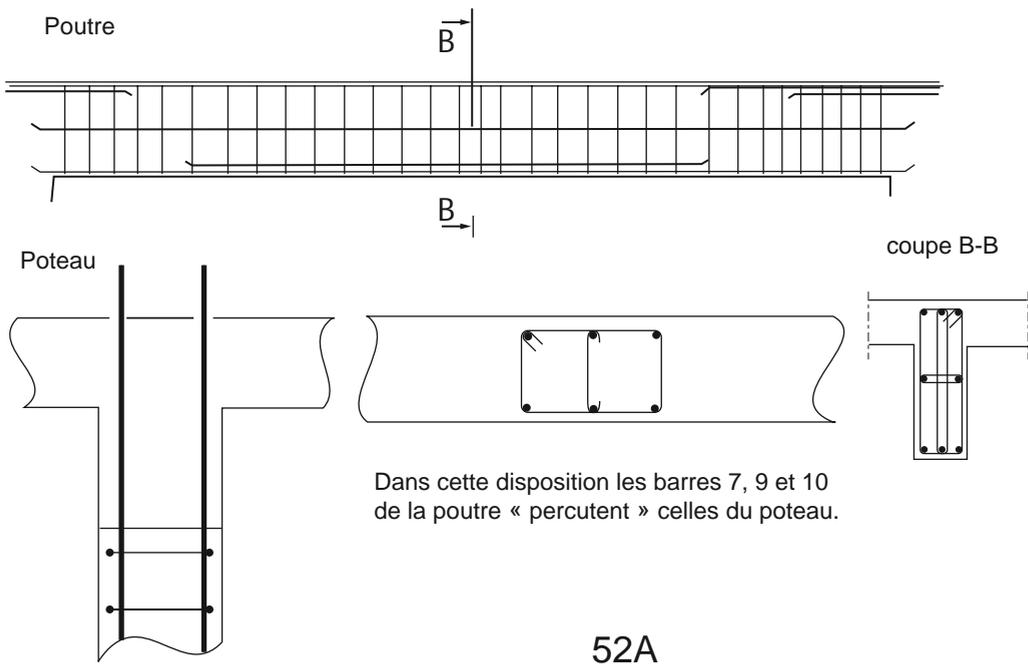
Ici encore, les boucles en U sont beaucoup plus commodes, et elles évitent la poussée au vide que peuvent provoquer des équerres mal positionnées. Autre avantage : deux U remplacent trois équerres dans le cas d'un angle, et quatre dans le cas d'un refend.



**Figure n° 51 : liaisons d'angles de chaînages, solutions avec équerres et avec boucles à plat.**

# 6.5 Appui intermédiaire de poutre sur poteau

En général, les poteaux et les poutres font l'objet de plans distincts. C'est pourquoi la compatibilité des ferrillages des poutres avec ceux des poteaux sur lesquels elles reposent n'est pas toujours vérifiée. Il arrive souvent qu'en respectant les positions figurant sur les plans, les barres supérieures de la poutre entrent en collision avec les armatures du poteau (voir figure n° 52A).



**Figure n° 52: appui de poutre sur poteau, difficultés de mise en œuvre, solution alternative**

C'est en particulier le cas lorsque la largeur de la poutre est la même que celle du poteau ce qui est assez courant. Bien entendu le problème du recouvrement des aciers du poteau des deux niveaux superposés se pose également à cet endroit. La meilleure solution semble donc de disposer des attentes verticales, ce qui permet de résoudre en même temps les deux difficultés (voir figure n° 52B).

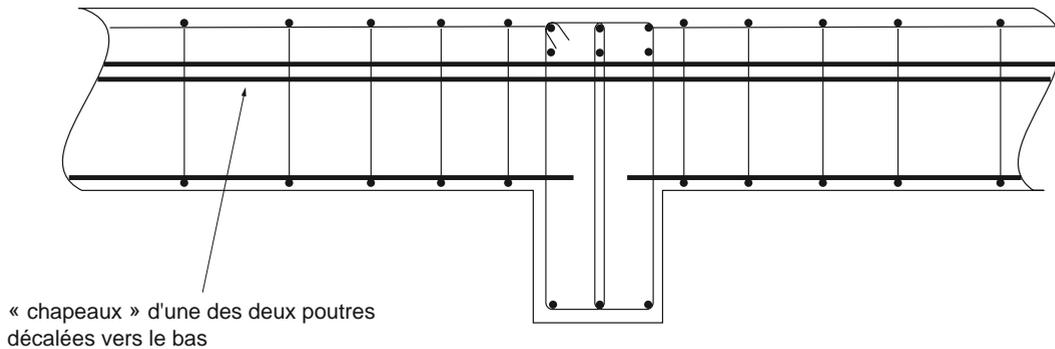
## 6.6 Appui intermédiaire d'une poutre sur une autre poutre

Dans ce cas, ce sont les armatures longitudinales des deux poutres qui risquent de se rencontrer. La poutre portée comporte toujours des barres supérieures, et la poutre porteuse peut en comporter aussi au moins dans certaines zones. Le problème est particulièrement délicat quand on se trouve en présence d'armatures de gros diamètre et parfois sur plusieurs lits.

Si aucune disposition particulière n'est prévue, c'est l'entreprise qui pose en coffrage qui choisira de faire passer l'armature d'une des deux poutres au-dessus de l'autre suivant son inspiration et parfois hors des cadres. Il peut ainsi arriver que l'écart entre la position réelle et la position théorique des barres dépasse largement les tolérances admises ou que l'enrobage ne soit pas respecté (voir figure n° 53).

Pour bien faire, il faut que le bureau d'études choisisse lui-même une position d'armature réalisable, en tienne compte dans ses calculs, et la représente de façon explicite sur les plans.

Si les poutres sont de même hauteur, le problème se pose aussi pour les armatures inférieures. On peut dans ce cas prévoir un léger dévoiement des barres inférieures, ou encore la mise en place de « clés » avec recouvrements.

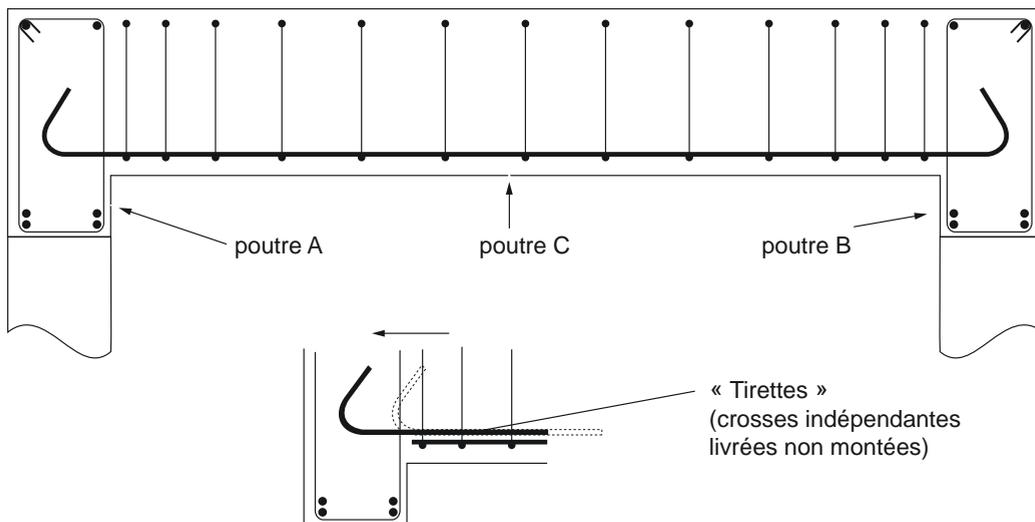


**Figure n° 53: appui d'une poutre sur une autre poutre, incidence sur la position des armatures.**

## 6.7 Poutre s'appuyant sur deux poutres porteuses

Dans le cas de cages de poutres posées assemblées, on peut rencontrer des difficultés si chaque poutre a été étudiée séparément sans se soucier de l'ensemble. La pose de la cage d'armature de la poutre C, faisant suite à celle des poutres A et B, demandera une manutention délicate pour introduire les ancrages aux appuis.

La solution est connue sous le nom de « tirettes » c'est-à-dire de crosses non assemblées et livrées simplement attachées en position rentrée dans la cage. Leur section et leur longueur doivent être calculées pour transmettre l'effort tranchant par recouvrement avec les barres inférieures. La pose de la cage C s'effectue alors sans problème et on glisse ensuite les tirettes dans la position prévue au plan.



**Figure n° 54: appui d'une poutre sur deux autres poutres  
difficultés de mise en œuvre, solution alternative.**

## 6.8 Ouvrages spéciaux

Les paragraphes précédents ont présenté quelques exemples des dispositions les plus fréquentes. Dans certains bâtiments et surtout en génie civil, on rencontre de nombreux autres cas plus ou moins complexes, tous particuliers. L'expertise de l'armaturier fabricant ou poseur est alors fondamentale pour trouver les meilleures solutions aux difficultés potentielles de mise en œuvre des armatures. Elle permet une véritable ingénierie de l'armature.

Ce travail ne peut s'effectuer qu'en coordination avec la conception des coffrages et la définition des phases de bétonnage, et bien entendu l'étude de béton armé.

Le bureau d'études doit non seulement s'assurer des possibilités de réalisation des armatures qu'il conçoit. Il lui appartient aussi d'en simplifier la fabrication et la pose en coffrage. Pour cela, il doit savoir en particulier si les armatures sont assemblées en usine et transportées sous forme de cages, ou au contraire assemblées sur site. Un contact avec l'armaturier est donc nécessaire en amont du

chantier. Cette pratique est assez généralisée pour les ouvrages de génie civil, mais reste exceptionnelle pour les bâtiments. Pourtant, ceux-ci présentent parfois des difficultés importantes. C'est la complexité et non la taille des ouvrages qui doit imposer un travail en commun, par ailleurs utile dans tous les cas.

Les logiciels de conception de ferrailage ne résolvent pas toujours très bien ce type de problème. Quand la difficulté est « interne » à une pièce, certains logiciels proposent au projeteur une ou plusieurs solutions. C'est à lui d'utiliser sa compétence pour effectuer le bon choix. Il doit toujours rester critique vis-à-vis des dispositions de ferrailage adoptées « par défaut ». Quand il s'agit d'une incompatibilité entre ferrailages de deux pièces, seule une intervention « manuelle » permet en général, pour l'instant, d'effectuer les adaptations nécessaires. C'est toujours le cas pour les ouvrages complexes. Les outils informatiques offrent certainement des possibilités de développement en particulier pour alerter le projeteur des risques de difficultés de ferrailage et des points sur lesquels un arbitrage entre plusieurs solutions est nécessaire.

# Pour une optimisation globale de l'armature

**7.1 Études d'optimisation globale**

**7.2 Importance de la conception du ferrailage**

**7.3 Évolutions depuis les origines du béton armé**

**7.4 Comparaison des habitudes de divers pays**

**7.5 Choix des espacements des armatures transversales**

**7.6 Nombre de repères différents**

**7.7 Diamètre des mandrins de façonnage**

**7.8 Exemple**

Dans le chapitre précédent des dispositions qui rendent plus commodes l'assemblage et la pose des armatures ont été présentées. Ces dispositions permettent à la fois de diminuer les coûts d'exécution et d'améliorer la qualité des armatures posées. Il s'agit de détails importants, mais ponctuels.

On peut aller plus loin en recherchant d'une façon plus générale une optimisation technique et économique des armatures. L'essentiel du coût de l'armature se trouve dans la matière première. Les gains correspondants ont été largement exploités depuis longtemps. L'informatisation a permis de franchir une étape supplémentaire en introduisant dans les programmes le « poids minimal » comme critère de choix unique ou prépondérant entre les divers ferraillements possibles. De leur côté, les armaturiers ont su améliorer leur productivité grâce à des matériels de dressage, de coupe, de façonnage et d'assemblage par soudure plus performants.

En revanche, il subsiste certainement des « gisements d'économie » dans une conception des armatures qui permettrait de diminuer sensiblement les temps d'exécution, quitte à consommer un peu plus d'acier. Ces temps d'exécution dépendent évidemment de l'organisation et des moyens de production de chaque armaturier. On peut cependant noter que :

- le temps nécessaire pour couper ou façonner une armature n'est pas proportionnel à sa section. Par exemple sur certaines machines, il ne faut pas plus de temps pour réaliser un cadre de diamètre 10 mm que le même cadre en diamètre 6 mm ;
- le temps d'assemblage dépend très peu du diamètre des armatures à assembler.

On peut aussi formuler quelques observations générales.

## 7.1 Études d'optimisation globale

Peu de recherches ont eu lieu dans ce sens. Ceci est probablement dû à la situation de sous traitant des armaturiers, qui les prive de tout lien contractuel direct avec les bureaux d'étude. Les armaturiers sont aussi partiellement responsables de cette situation pour n'avoir pas su adopter des barèmes de prix de vente modulés en tenant compte de leurs coûts de production. Les prix de revient réels d'armatures très différentes sont ainsi occultés par les « prix moyens à la tonne ».

## 7.2 Importance de la conception du ferrailage

Les paramètres déterminants pour les temps d'exécution des armatures sont les suivants :

- nombre de barres à couper;
- nombre d'armatures à façonner;
- nombre d'armatures correspondant à des « repères » différents (diamètres, dimensions, formes, etc.);
- nombre de « plis » ou façonnages à effectuer;
- nombre de points d'assemblage;
- complexité des façonnages;
- complexité d'assemblage;
- complexité de la pose.

C'est au stade de la conception que ces paramètres sont totalement définis.

## 7.3 Évolutions depuis les origines du béton armé

Lorsqu'on compare des plans des années trente avec ceux d'aujourd'hui, on note peu de différences visibles dans la forme des armatures, depuis l'abandon des cadres en feuillards. Ces différences se limitent en fait au remplacement des crochets à 180°, chers aux pionniers du béton armé, par les ancrages à 135° et à l'abandon quasi général des « barres bateaux ».

Est-il bien normal que si peu de chose aient changé malgré l'évolution des caractéristiques des aciers, des techniques de production et des méthodes de calcul ?

## 7.4 Comparaison des habitudes de divers pays

Si maintenant on compare des plans établis selon les règles et habitudes françaises avec ceux d'autres pays, plusieurs différences sont frappantes.

### 7.4.1 - Diamètres des aciers utilisés.

---

Les diamètres des aciers utilisés en France sont en général beaucoup plus faibles que dans les autres pays. Tout se passe comme si le passage des aciers de limite d'élasticité 235 MPa à 400 MPa puis à 500 MPa s'était traduit uniquement par la diminution des diamètres, et non par celui du nombre de barres. Nous avons vu au chapitre 4 que l'origine de cette pratique se trouvait peut-être dans un souci de limitation de l'ouverture des fissures. En fait rien ne justifie cette habitude. On n'enregistre pas plus de sinistres dans les pays où l'on ignore l'emploi du diamètre 6 mm, et où, pour certains d'entre eux, le diamètre 8 mm n'est que rarement utilisé. La rigidité des aciers de plus gros diamètre permet un meilleur respect des dimensions des armatures et des enrobages. On constate en effet souvent que les désordres dus à un enrobage insuffisant concernent des armatures de faible diamètre qui se sont déformées lors des manutentions ou de la pose en coffrage. L'augmentation des diamètres constitue manifestement un facteur d'amélioration de la qualité dans un domaine très sensible.

La seule raison pour laquelle ce type de disposition est privilégié en France, est que les faibles diamètres permettent d'approcher au plus près les sections de calcul. On croit alors avoir obtenu la solution la plus économique. En fait, l'acier est d'autant plus cher à la tonne que son diamètre est faible, et surtout, cette façon de faire multiplie le nombre de barres à façonner et à assembler, et donc le coût de production.

L'adoption de diamètres plus élevés à la fois pour les armatures longitudinales et transversales, (tout en respectant, bien entendu les exigences réglementaires des règles BAEL ou de l'Eurocode 2) doit permettre des économies malgré les suppléments de poids qu'elle entraînerait.

## 7.4.2 - Utilisation des étriers

---

On constate aussi en France un usage systématique des étriers dès que les poutres comportent plus de deux files de barres longitudinales. Rien n'impose cette disposition ni dans les règles BAEL ni dans l'Eurocode 2. Dans le cas où plusieurs lits d'armatures sont prévus, des étriers sont nécessaires au maintien des barres, mais il suffit pour cela d'en prévoir un petit nombre largement espacé.

En adoptant le plus souvent possible des cadres sans étrier, l'introduction des armatures longitudinales se trouve facilitée. De plus, le nombre d'armatures façonnées et le nombre de points d'assemblage sont ainsi diminués.

Lorsqu'un seul cadre est insuffisant, il est préférable de prévoir des épingles plutôt que des étriers ce qui rend aussi le montage plus commode.

## 7.4.3 - Fermetures des cadres

---

Les problèmes liés aux fermetures des armatures transversales ont été présentés au chapitre précédent. La proposition qui a été formulée dans ce chapitre est rappelée ci-dessous. Elle consiste à convenir d'un accord entre bureaux d'études et armaturiers comportant les clauses suivantes qui respectent les prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-1 :

- sauf indication contraire figurant explicitement sur le plan :
  - les cadres sont exécutés avec deux fermetures à 90° suivies d'une longueur droite de 10 diamètres ;
  - les épingles sont ancrées par des crochets à 150° suivis de longueurs droites de 5 diamètres ;
  - les étriers sont munis d'ancrages à 180° suivis de longueurs droites de 5 diamètres.
- les crochets à 135° ne sont réalisés que sur demande expresse du bureau d'études figurant sur les plans.
- les cadres ayant uniquement une fonction de montage sont signalés sur les plans par la mention « fermeture libre ». Ces cadres ne sont pas soumis aux règles techniques applicables aux armatures.

## 7.5 Choix des espacements des armatures transversales

Les logiciels de calcul sont actuellement conçus de façon à proposer des espacements d'armatures transversales conduisant à des sections aussi proches que possible de celles obtenues par le calcul. On obtient ainsi des valeurs d'espacements quelconques et variables un peu analogues à celles des anciennes « séries de Caquot » (la figure n° 7 au paragraphe 3.2 en montre un exemple).

Cette façon de procéder oblige les armaturiers à effectuer un tracé spécifique pour chaque poutre. En fait, le calcul impose uniquement la section d'armature transversale à prévoir sur une longueur de poutre égale à son « bras de levier ».

Il est possible de systématiser des espacements multiples de cinq ou dix centimètres, ce qui permet d'utilisation de gabarits très simples et réutilisables pour le positionnement des cadres.

## 7.6 Nombre de repères différents

En matière de nombre de repères, l'informatique apporte également au projeteur des facilités nuisibles à la productivité de l'armaturier. Elle permet en effet de multiplier le nombre d'armatures avec des cotes différentes de quelques centimètres là où des séries seraient possibles sans aucun inconvénient. Un cas typique est celui des cadres ou barres « variables » citées au paragraphe 5.2.2. En acceptant un léger supplément de poids et des recouvrements variables, on peut simplifier le ferrailage et diminuer le nombre d'armatures différentes.

La même observation peut être faite pour les ensembles montés (poutres ou poteaux par exemple), pour lesquels une standardisation est parfois possible.

## 7.7 Diamètres des mandrins de façonnage

Ce sujet a été traité dans les chapitres 5 et 6. L'application de l'Eurocode 2 Partie 1-1 risque d'entraîner l'apparition sur les plans d'un nombre infini de diamètres de mandrins issus directement du calcul.

Une solution consiste à établir une liste de diamètres préférentiels, les logiciels de dessin d'armature utilisant systématiquement le diamètre de cette liste immédiatement supérieur à la valeur minimale calculée.

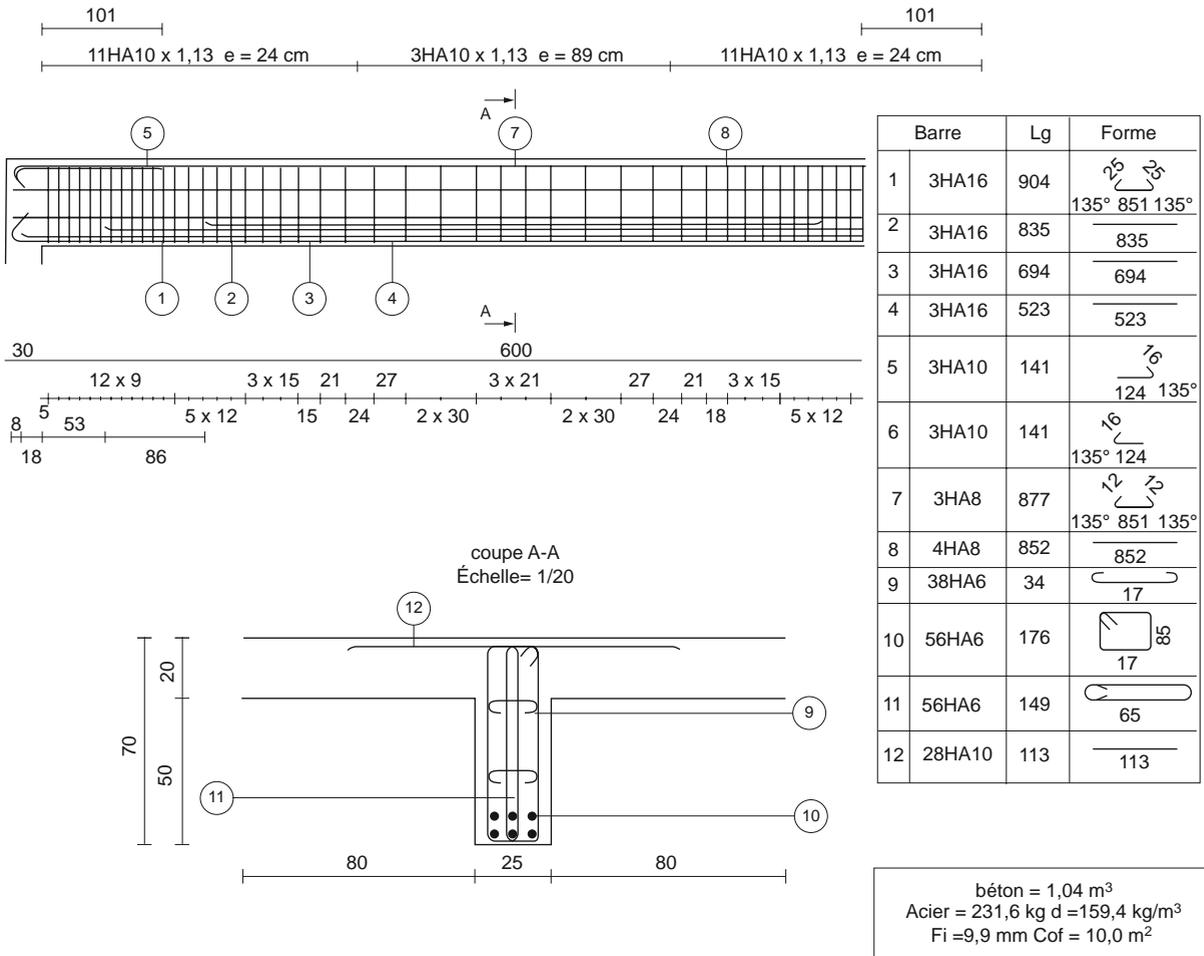
De plus, si l'habitude de ne pas préciser les diamètres de mandrins sur les plans perdure, il pourrait être convenu entre bureaux d'études et armaturiers d'un diamètre de mandrin pour chaque diamètre d'acier qui serait utilisé « par défaut ».

L'emploi de mandrins de diamètres différents serait réservé aux cas où ils seraient exigés et explicitement spécifiés sur les plans par le bureau d'études.

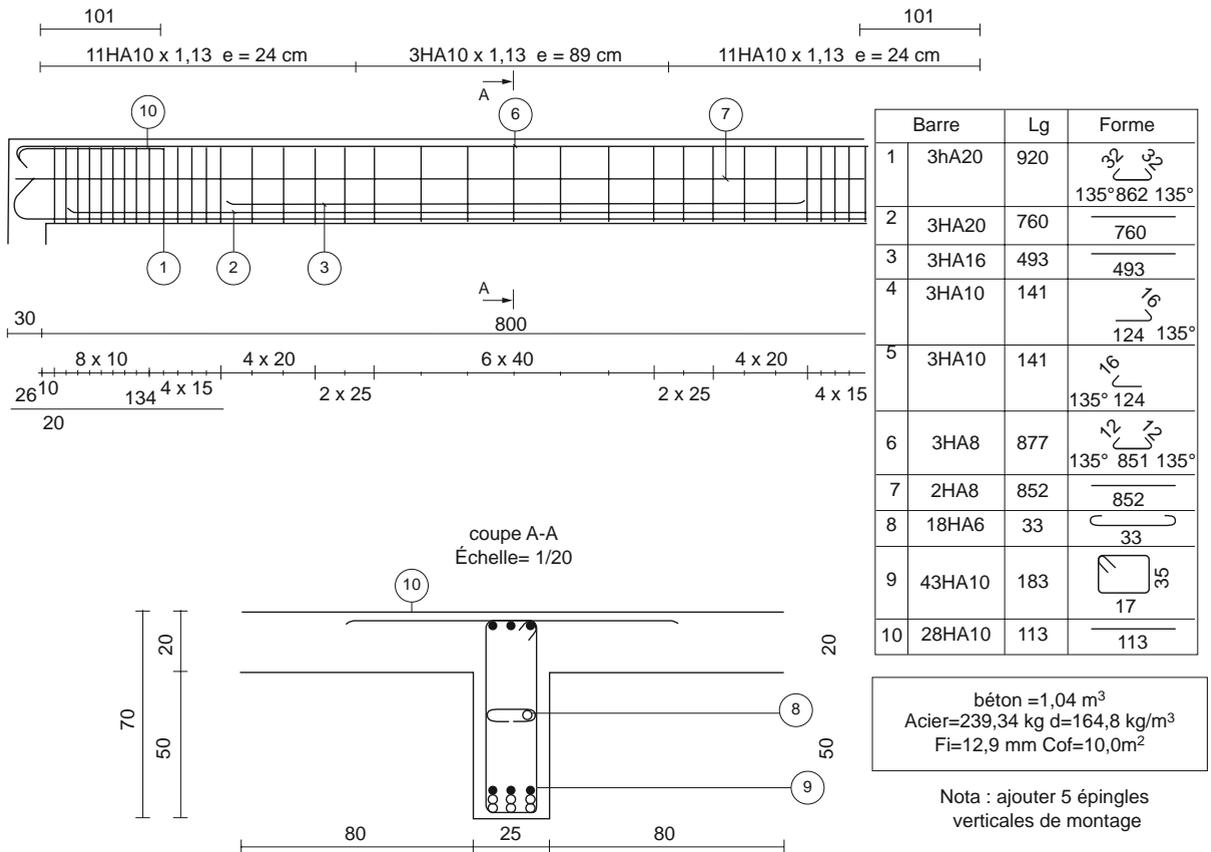
## 7.8 Exemple

À titre d'exemple, on trouvera ci-dessous deux solutions de ferrailage d'une même poutre uniformément chargée qui ont été dessinées par le même logiciel. Bien entendu elles satisfont toutes deux aux exigences réglementaires (aussi bien celles en vigueur à fin 2004 que celles du nouveau contexte réglementaire). Leurs spécificités sont les suivantes :

- solution « de base » : c'est la solution proposée par l'ordinateur sur la base des habitudes en vigueur.
- variante ; dans cette solution, le projeteur a imposé :
  - des diamètres plus gros pour les armatures longitudinales et transversales ;
  - des cadres sans étriers. On peut noter que le maintien des barres de la file centrale nécessite quelques épingles verticales de montage que le logiciel ne permet pas de dessiner ;
  - la suppression d'une des deux épingles horizontales et des filants associés (repères 8 et 9) qui se justifie compte tenu de la meilleure rigidité des cadres ;
  - des espacements de cadres multiples de 5 cm, proches de ceux de la solution précédente. Dans le cas présent, cette répartition a du être effectuée « à la main », le logiciel permettant seulement de vérifier qu'elle est satisfaisante ;
  - des espacements de 40 cm dans la partie centrale de la poutre où les règles BAEL ainsi que l'Eurocode 2 l'autorisent.



**Figure n° 55A : ferrailage de poutre, exemple de sortie d'ordinateur, solution de base.**



**Figure n° 55B: ferrailage de poutre, exemple de sortie d'ordinateur, variante.**

En analysant les principaux paramètres ayant une incidence sur le coût de production de la cage de poutre assemblée, on constate que la variante présente les écarts suivants par rapport à la solution de base :

- nombre de barres à couper: - 87, soit une diminution de 50 %;
- nombre d'armatures à façonner: - 82, soit une diminution de 51 %;
- nombre minimum de points de soudure: - 148, soit une diminution de 43 %;
- diamètre moyen: + 2,9 mm;
- possibilité d'utiliser un gabarit pour positionner les cadres;
- poids d'acier: + 8 kg, sur un total de 232 kg, soit une augmentation de 3,8 %.

Chaque armaturier dispose d'éléments de coût de production qui lui sont propres (coût matière première, coût main d'œuvre, coût machine, etc.). Il lui appartient à partir de ces éléments, de tirer les conclusions qui découlent de ces comparaisons pour son cas particulier.

Il est aussi probable que certains ingénieurs de bureaux d'études n'accepteront pas l'une ou l'autre des modifications effectuées entre la solution de base et la variante. Rappelons que dans tous les cas la conception de l'armature reste de leur responsabilité.

La diminution substantielle de tous les paramètres influant sur le temps de production mérite d'être prise en considération. Cependant, même si la variante paraît globalement intéressante, on peut se demander comment elle pourrait être proposée, puisqu'elle nécessite un poids d'acier plus élevé.

La conclusion de ce guide est consacrée à l'analyse des causes de blocage et à la recherche de moyens permettant de les surmonter.



Chapitre

# 8

# Conclusions

Les observations, questions ou propositions formulées au chapitre 7 s'adressent à tous ceux qui interviennent dans la conception et la réalisation des armatures.

Certaines difficultés qui ont leur origine dans les textes réglementaires ont été relevées. La mise en application de l'Eurocode 2 devrait en éliminer mais risque d'en générer d'autres. Si la pratique en montre la nécessité, il reste possible d'adopter des conventions entre bureaux d'études et armaturiers.

En dehors de cet aspect réglementaire, les acteurs les plus concernés sont manifestement les bureaux d'études chargés d'établir les plans d'exécution. Même si leurs missions ne sont pas toujours assez précises, on ne peut pas contester qu'il leur incombe de concevoir des armatures conformes, parfaitement définies et réalisables par les armaturiers. Ce guide doit les aider à mieux communiquer avec ceux qui exécuteront les ferrailages qu'ils conçoivent.

Cependant, pour viser l'objectif d'une véritable optimisation, certains changements plus fondamentaux sont nécessaires. Le « nœud du problème » se situe dans la façon de traiter les contrats d'études d'exécution et les marchés de sous-traitance des armatures.

Aujourd'hui, pour les entreprises, ces deux sujets sont totalement distincts. D'une part, elles confient à un bureau une mission d'étude des ouvrages de béton armé. Les exigences fixées concernant les armatures, sont la conformité technique ainsi que l'économie en poids d'acier (ou tout au moins le respect des quantités prévues). D'autre part, elles sous-traitent les prestations d'exécution et éventuellement de pose des armatures sur la base d'un prix d'armatures à la tonne. Ce prix est parfois modulé suivant le diamètre moyen. Souvent, il s'agit au contraire d'un prix à la tonne « tout confondu ».

Dès lors, toute évolution est impossible. En effet :

- pour l'entreprise le coût du poste armature est figé ; l'optimisation ne peut plus l'intéresser ;
- pour le bureau d'études, prendre en compte les problèmes de façonnage, d'assemblage et de pose correspond à un travail supplémentaire non rémunéré ; seules sa conscience professionnelle et ses bonnes relations avec les armaturiers peuvent l'inciter à le faire dans des limites bien compréhensibles ;
- pour l'armaturier, alors cantonné dans un rôle d'exécutant, les possibilités d'influencer réellement la conception sont évidemment restreintes ;
- le concepteur de logiciel s'attache à répondre aux demandes de ses clients. Aucune demande d'optimisation n'étant formulée, il ne s'y intéresse pas.

Cette situation regrettable a sans doute des origines multiples dans lesquelles tous les intervenants ont une part de responsabilité, et elle doit évoluer.

Pour cela, il faut nécessairement structurer la relation entre bureau d'études et armaturier afin qu'ils puissent proposer ensemble aux entreprises par exemple la prise en charge conjointe des études d'exécution et de la fourniture avec pose éventuelle des armatures. Cette association pourra prendre différentes formes juridiques et contractuelles à définir. Dans tous les cas, elle impliquera des changements notables.

Dans cette association, le bureau d'études reste bien entendu seul compétent et décideur en matière de conformité mais, dans les limites que celle-ci impose. Il doit accepter de prendre en compte les directives de l'armaturier pour la conception de l'armature. Il doit intégrer dans ses honoraires le surcoût correspondant à ces nouvelles contraintes. On peut d'ailleurs penser qu'après un certain temps de collaboration ces contraintes seront pour l'essentiel intégrées. Le surcoût deviendra alors négligeable.

L'armaturier pourra alors exploiter pleinement son savoir-faire conduisant à une conception qui réduira les coûts de main-d'œuvre tout en favorisant la qualité. Il sera donc en mesure de traiter son marché sur la base de prix à la tonne diminués en conséquence.

Les outils permettant cette mise en commun des compétences des bureaux d'étude et de celles des armaturiers sont maintenant à portée de main.

En premier lieu, les logiciels de dessins d'armature permettent facilement de comparer diverses solutions. On peut ainsi mesurer l'incidence sur le poids d'acier de dispositions permettant un meilleur rendement. Les nomenclatures comportent les nombres de pièces. Elles pourraient aussi indiquer le nombre de points d'assemblage. Chaque armaturier pourrait, en fonction de ses moyens de production, valoriser les divers paramètres de coût. Des choix de principes de ferrailage différents de ceux actuellement favorisés pourraient être introduits sans difficulté.

Internet permet désormais l'échange des fichiers à distance et des allers-retours entre bureaux d'études et armaturiers. Il est donc possible d'optimiser les dessins de ferrailage avant qu'ils ne soient figés et diffusés sous forme de plans sur papier.

Cette évolution doit permettre une économie obtenue sur le coût des armatures, supérieure au surcoût des études. C'est évidemment la condition pour que les entreprises acceptent cette nouvelle démarche et que les donneurs d'ordre y soient favorables.

Quelques chantiers expérimentaux organisés sur ce principe, soigneusement suivis et analysés permettraient de vérifier l'intérêt de cette façon de travailler.

Les initiatives pourront venir de l'une quelconque des catégories d'acteurs. Dans tous les cas, l'AFCAB souhaite bien entendu vivement y être associée.

Chapitre

# 9

# Annexes

## **Annexe 1**

**Analyse des prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-1  
(projet d'avril 2004) relatives au façonnage**

## **Annexe 2**

**Processus de détermination de l'enrobage nominal suivant  
l'Eurocode 2 Partie 1-1 complété par son Annexe Nationale  
Française**

# Annexe 1

## Analyse des prescriptions de l'Eurocode 2 Partie 1-1 (projet d'avril 2004) relatives au façonnage

L'objet de cette annexe est de présenter une analyse des règles de l'Eurocode 2 (projet d'avril 2004) relatives au façonnage et les conséquences qui découlent de cette analyse.

Ces prescriptions se trouvent dans les articles :

- 8.3 Diamètres admissibles des mandrins de façonnage pour les barres pliées ;
- 8.4 Ancrage des armatures longitudinales ;
- 8.5 Ancrage des armatures d'effort tranchant et autres armatures transversales.

**Il convient de consulter ces articles autant que nécessaire.**

### **1 - Tableau 8.1N de l'article 8.3 (2). Diamètres minimaux de façonnage**

---

Les diamètres minimaux prescrits par le tableau 8.1N sont les mêmes quelle que soit la fonction de l'armature. Ceci est normal puisqu'il s'agit « d'éviter le dommage aux armatures ». Par contre le tableau précise : « dans le cas des coudes, crochets ou boucles (voir figure 8.1) ». Or, la figure 8.1 à l'article 8.4 ne concerne que les ancrages.

On peut cependant supposer que ces diamètre minimaux s'imposent pour tous les façonnages quelle que soit leur fonction (ancrage ou tout autre changement de direction).

## **2 - Article 8.3 (3). Justification vis-à-vis de la rupture du béton. Cas des armatures transversales**

---

L'expression (8.1) de l'Eurocode 2 à utiliser pour cette vérification est analogue à celle contenue dans l'article A.6.1.25 des règles BAEL 91.

En revanche, contrairement aux règles BAEL 91, l'Eurocode 2 ne dispense pas explicitement de cette vérification pour tous les façonnages de cadres et autres armatures transversales.

L'article 8.3 (3) énumère trois conditions à remplir simultanément pour que cette justification ne soit pas nécessaire :

- première condition : la barre n'est pas disposée près de la surface (plan de flexion proche du parement) et il existe une barre transversale de diamètre supérieur ou égal à  $F$  à l'intérieur de la partie courbe. Cette exigence est très généralement satisfaite pour les armatures transversales ;
- deuxième condition : le diamètre du mandrin est supérieur ou égal aux valeurs recommandées du tableau 8.1 N. Cette condition est obligatoirement remplie puisqu'elle est imposée, (et non simplement recommandée) par le tableau 8.1 N ;
- troisième condition : l'ancrage nécessaire de la barre ne dépasse pas 5 diamètres au-delà de l'extrémité de la partie courbe. Sur ce point, il faut se référer aux articles 8.4.1 et 8.5. Ces articles prescrivent une longueur droite de 5 diamètres après la courbure si l'angle de façonnage de l'ancrage est au minimum à  $150^\circ$  et de 10 diamètres s'il est inférieur. La condition est donc remplie pour les ancrages pliés au minimum à  $150^\circ$ . Par contre, la vérification serait exigée pour les crochets à  $135^\circ$  ou  $90^\circ$ .

Il serait étonnant que l'Eurocode 2 revienne sur la pratique existant de longue date en France et dans plusieurs autres pays qui dispense vérifier pour toutes les armatures transversales la « condition de non écrasement du béton ». Ceci conduirait à des diamètres de façonnage pratiquement inacceptables ou à l'abandon des fermetures de cadres par ancrage à  $90^\circ$  et  $135^\circ$ .

Par ailleurs, l'expression (8.1) prend en compte « l'effort de traction... à l'origine de la partie courbe ». Cette notion de calcul n'existe pas pour les cadres de poteaux.

**On peut donc supposer qu'en dehors de cas exceptionnels, la justification vis-à-vis de la rupture du béton ne s'applique pas aux armatures transversales, quand elles comportent une barre à l'intérieur de la partie courbe.**

### 3 - Définition précise des diamètres de mandrins

---

Les diamètres minimaux découlant de l'expression (8.1) sont plus élevés que ceux du tableau 8.1N.

Les bureaux d'étude devront donc systématiquement calculer et préciser sur les plans le diamètre de cintrage à adopter pour toutes les armatures autres que les cadres.

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, et il serait convenu de réaliser systématiquement les façonnages sur le mandrin de diamètre préférentiel immédiatement supérieur à celui résultant du calcul.**

# Annexe 2

## Processus de détermination de l'enrobage nominal suivant l'Eurocode 2, Partie 1-1 complété par son Annexe Nationale Française

Cette annexe présente le processus de détermination de l'enrobage nominal suivant l'Eurocode 2 partie 1.1 complété par son Annexe Nationale française. Les tableaux de cette annexe sont repérés par la mention « (F) »

Les 7 étapes du processus sont les suivantes :

### **1 - Détermination de la classe d'exposition de la structure**

---

La classe d'exposition est imposée au maître d'œuvre en fonction des conditions d'environnement du projet dont elles constituent une donnée de base. Elle est donnée par le tableau 4.1 (F) à l'article 4.2 (2) de l'Annexe Nationale française.

### **2 - Choix de la classe structurale**

---

L'EN 1990 – Bases de calcul des structures, définit 6 classes structurales. Chaque classe correspond à une durée d'utilisation de projet. La classe à utiliser pour les bâtiments et ouvrages de génie civil courants est S4 (durée d'utilisation de projet de 50 ans) pour des bétons conformes aux tableaux N.A.F.1 ou N.A.F.2 de l'Annexe Française de la norme NF EN 206-1. La classe des ponts est S6.

Les possibilités d'adoption d'une classe structurale différente en fonction de choix particuliers pour le projet, engageant le maître d'œuvre, sont données par le tableau 4.3 N (F) à l'article 4.4.1.2 (5) de l'Annexe Nationale française.

### **3 - Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité « $C_{\min, \text{dur}}$ »**

---

À partir de la classe d'exposition et de la classe structurale du projet, le tableau 4.4 N à l'article 4.4.1.2 (5) de l'Eurocode 2 Partie 1.1 permet de déterminer l'enrobage minimal vis-à-vis de la durabilité «  $C_{\min, \text{dur}}$  ».

### **4 - Prise en compte des réductions et (ou) des augmentations éventuelles de « $C_{\min, \text{dur}}$ »**

---

- L'article 4.4.1.2 (7) de l'Annexe Française précise ensuite que l'enrobage «  $C_{\min, \text{dur}}$  » peut être réduit d'une valeur «  $\Delta C_{\text{dur, st}}$  » fixée par les documents particuliers du marché, dans le cas d'utilisation d'armatures en acier dont la résistance à la corrosion est éprouvée (par exemple armatures inox). Ce choix engage le maître d'œuvre.
- L'article 4.4.1.2 (8) de l'Annexe Française précise ensuite que l'enrobage «  $C_{\min, \text{dur}}$  » peut être réduit d'une valeur «  $\Delta C_{\text{dur add}}$  » fixée par les documents particuliers du marché, dans le cas de mise en place d'un revêtement adhérent assurant une protection complémentaire justifiée vis-à-vis des agents agressifs. Ce choix engageant le maître d'œuvre.
- Inversement, l'Eurocode 2 Partie 1.1 donne en 4.4.1.2 (11) et 4.4.1.2 (13) les valeurs d'augmentation de l'enrobage minimal à adopter dans les cas suivants:
  - parements irréguliers ;
  - abrasion du béton.

### **5 - Détermination de l'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence « $C_{\min, b}$ »**

---

L'enrobage minimal vis-à-vis de l'adhérence «  $C_{\min, b}$  » est donné par le tableau 4.2 à l'article 4.4.2.1 (3) de l'Eurocode 2 Partie 1.1

## **6 - Détermination de l'enrobage minimal « $C_{\min}$ »**

---

L'enrobage minimal  $C_{\min}$  est déterminé par une formule donnée dans l'article 4.4.2.1 de l'Eurocode 2 partie 1.1 à partir de «  $C_{\min, b}$  », «  $C_{\min, \text{dur}}$  », «  $\Delta C_{\text{dur, st}}$  » et «  $\Delta C_{\text{dur, add}}$  ».

## **7 - Prise en compte des tolérances d'exécution. Détermination de l'enrobage nominal « $C_{\text{nom}}$ »**

---

L'enrobage nominal «  $C_{\text{nom}}$  » s'obtient en majorant l'enrobage minimal «  $C_{\min}$  » de la tolérance pour exécution «  $\Delta C_{\text{dev}}$  ».

L'Annexe française en 4.4.1.3 (3) prescrit la valeur «  $\Delta C_{\text{dev}}$  » = 10 mm sauf justification particulière.

Le même article définit les possibilités de réduire la valeur de «  $\Delta C_{\text{dev}}$  » dans les cas où un contrôle de qualité inclut des mesures d'enrobage des armatures.

Dans l'article 4.4.1.3 (4) l'Eurocode 2 Partie 1.1 prescrit de majorer l'enrobage minimal dans le cas d'un béton coulé au contact de surfaces irrégulières (sol ou béton de propreté par exemple) et l'Annexe Française donne les valeurs de l'enrobage minimal à adopter dans ces cas.

---

**Crédit photographique**  
*AGIBAT, BARTEC, BLB CONSTRUCTIONS,*  
*FORNACE MANNA, GERMAIN ARMATURES,*  
*GROUPE FIMUREX, PRESIDER, SNAAM,*  
*X, tous droits réservés.*

**Couverture :** D. Lozach  
**Illustrations :** E. Vallecillo  
**Réalisation :** Amprincipe  
R.C.S. Paris B 389 103 805  
**Impression :** Imprimerie Mame