



A

Structure Les différentes typologies d'armatures du béton

La construction moderne ne saurait s'en passer. Un bâtiment en béton armé consomme 40 à 80 kg d'acier par mètre cube. Une proportion qui peut atteindre 200, voire 300 kg par mètre cube pour les ouvrages les plus sollicités. Aujourd'hui, les armatures sont soit fabriquées sur mesure, soit disponibles sur catalogue.

L'idée d'armer le béton s'inscrit dans l'histoire récente de ce matériau, que les Romains utilisaient déjà sous forme de mortier dans la masse de leur construction mais dont la recette s'était perdue. On doit les premières utilisations d'armatures métalliques à une poignée d'entrepreneurs audacieux ayant pressenti dès les années 1850 le caractère innovant de l'association acier-béton. À l'empirisme des débuts succède un important travail de recherche et de caractérisation qui met en lumière la compatibilité des deux matériaux. Selon Mouloud Behloul, directeur innovation chez Lafarge France, celle-ci s'opère sur trois aspects : « Le premier est la dilatation thermique. Sous l'effet des variations de température, le béton et l'acier se dilatent ou se rétractent dans le même sens, sans générer ni délamination ni pathologie. Leurs coefficients de dilatation sont à peu près équivalents. Le deuxième point concerne la durabilité. À l'air libre, l'acier se corrode. Noyé dans le béton, il est protégé par un pH basique, de l'ordre de 13 ou 14, et ne rouille pas. Le troisième et dernier aspect est d'ordre mécanique. Si le béton affiche une très bonne résistance en compression – il peut supporter des charges de plus de 100 MPa –, il a une faible résistance à la traction. L'acier la lui confère ».

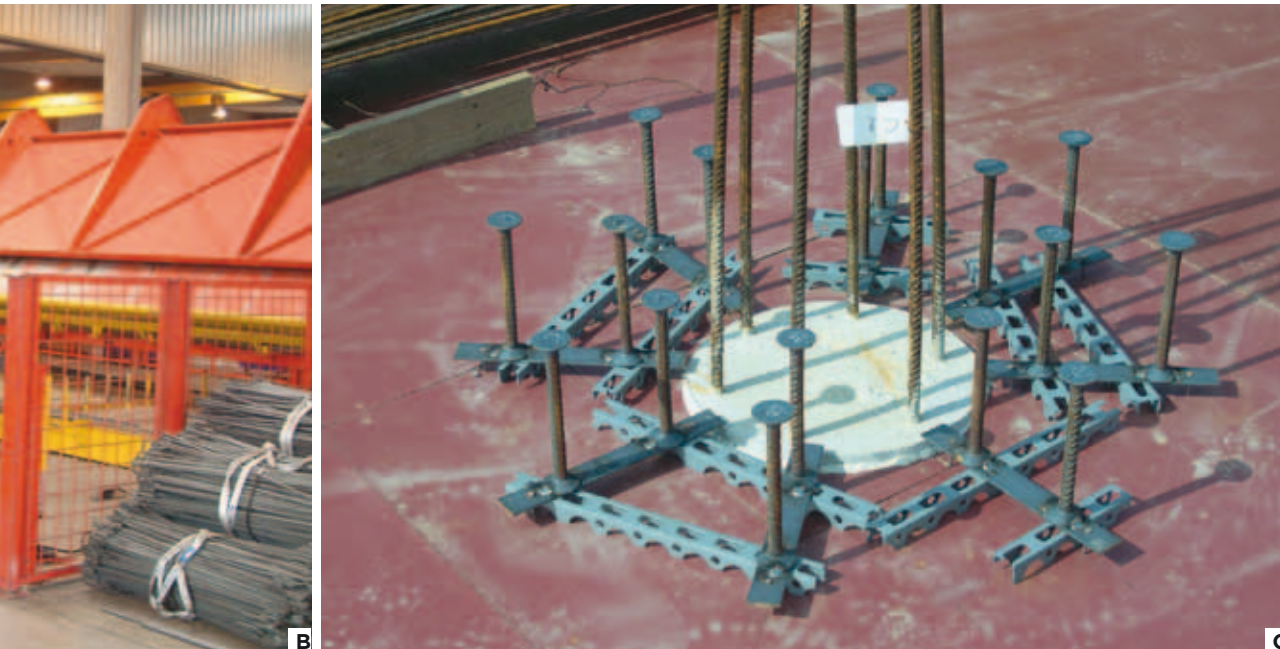
Aux premières heures du béton armé, les armatures étaient de simples grillages à poule, avant de devenir

des tiges lisses, des « fers » à béton comme on avait coutume de les appeler. Le remplacement progressif du fer par l'acier a permis un important gain de performances, qu'une meilleure maîtrise de la fabrication n'a fait que renforcer. « La limite d'élasticité de la plupart des armatures pour bâtiment atteint aujourd'hui 500 MPa. Elle était de 400 MPa il y a vingt-cinq ans, et de 200 MPa il y a une quarantaine d'années. Les fibres utilisées dans les nouveaux bétons à ultra-hautes performances affichent, quant à elles, plus de 1 000 à 2 000 MPa », résume Mouloud Behloul.

Une haute adhérence grâce au relief

Les progrès se situent également au niveau de l'adhérence de l'acier au béton que le recours à des aciers à relief a amélioré. « Le crantage par des reliefs en hauteur, les "verrous", ou en creux, les "empreintes", évite qu'ils ne glissent dans le béton et assure une meilleure transmission des efforts entre les deux matériaux », note Jean-Michel Sohm, directeur industriel de la Société nouvelle des armatures assemblées Mure (Snaam).

Aujourd'hui, « entre 1 et 1,5 million de tonnes d'armatures est utilisée chaque année par le secteur du bâtiment », précise Hervé Tersen, directeur général de l'Association professionnelle des armaturiers (APA). Les aciers pour béton armé proviennent de barres de grande



Docs. Bouygues Construction/Laurent Blossier; Snaam; Plakagroup

A Acier et béton sont complémentaires: l'acier confère au béton une résistance à la traction et à la flexion qu'il n'a pas, tandis que le béton le protège de la corrosion.

B Les aciers sont coupés et façonnés sur des cadreuses ou des cintreuses, avant d'être assemblés en armatures sur des tables de montage.

C Les goujons sont des barres en acier inoxydable ou galvanisé, sous avis techniques. Ils sont utilisés pour reprendre des efforts de cisaillement, comme ici à la jonction d'une dalle et d'un poteau.

longueur (6 à 12 m) ou de couronnes de fil, ayant fait l'objet d'un laminage à chaud ou à froid, et d'un crantage. Chaque acier est identifiable par un marquage qui permet de remonter jusqu'à l'usine de production et confère ainsi une traçabilité en cas de sinistre.

La norme NF A-35-080 établit plusieurs critères pour distinguer les aciers (*lire l'encadré ci-contre*). Les nuances les classent ainsi en fonction de leur ductilité, c'est-à-dire leur capacité à s'allonger avant de casser. Les plus utilisées sont les B500A et B500B, appellations qui remplacent les anciennes Fe TE 500, FeE500-2 et FeE500-3, avec une prédominance de l'acier B500B à la suite du dernier découpage sismique du territoire français. Avec un allongement à rupture deux fois plus élevé que celui du B500A, l'acier B500B permet au bâtiment d'absorber davantage d'énergie en cas de séisme. En revanche, « l'acier inoxydable reste peu utilisé, du fait d'un coût élevé. Il est réservé à des applications spécifiques nécessitant des propriétés anticorrosion, par exemple certains rupteurs thermiques préfabriqués, ou amagnétiques, comme dans les salles de radar, radio, scanner ou d'imagerie médicale », rappelle Hervé Tersen.

Tous les aciers pour béton armé se caractérisent par leur limite d'élasticité (R_e), leur résistance à la traction (R_m), leur allongement sous charge (A_{gt}), ainsi que leurs caractéristiques géométriques (diamètre, masse linéique, relief).

Des produits sur plans ou prêts-à-l'emploi

Les armatures pour béton armé sont des assemblages d'aciers filants coudés ou non qui assurent la reprise des efforts de traction et de flexion, et de cadres, étriers ou épingles qui reprennent les efforts tranchants ou de cisaillement. Elles sont complétées par des produits connexes: coupleurs, goujons, boîtes d'attente, écarteurs de nappes, etc. Les treillis soudés ne sont pas considérés comme des armatures mais comme des aciers pour béton armé qui s'utilisent tels quels dans le ferrailage des planchers.

Il existe deux grandes familles: d'un côté, les armatures sur catalogue ou prêtes à l'emploi; de l'autre, les armatures sur plans. Principalement destinées à la maison individuelle ou au petit collectif, les premières sont fabriquées à grande cadence et distribuées par les réseaux de négoce et marchands de matériaux. Elles sont utilisées sur des chantiers à faibles descentes de charges et font l'objet de calculs simplifiés, d'où un diamètre standard de 7, 8, 10 ou 12 mm pour les aciers filants et de 5 mm pour les cadres. Les maisons traditionnelles étant le plus souvent réalisées en parpaings, les armatures se réduisent à la réalisation de chaînages, longrines et autres linteaux, poutres, chevêtres, etc. Les armatures sur plans, elles, sont fabriquées à la demande, le plus souvent dans des ateliers spécialisés, et parfois sur chantier. Elles répondent aux besoins de la plupart des chantiers de construction en béton armé et utilisent pour cela des aciers standard dont le diamètre mesure 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32 et 40 mm.

Avant de fabriquer une armature sur plans, ou de choisir un produit sur catalogue, il faut connaître la section d'acier nécessaire par mètre linéaire ou mètre carré de béton, laquelle est fonction des descentes de charges et des efforts appliqués sur l'ouvrage. Le dimensionnement est réalisé par des BET struc- (●●●)

Caractéristiques principales

- **Nuance**: elle correspond au classement des aciers en fonction de leur ductilité, c'est-à-dire de leur capacité à s'allonger avant de casser. Les nuances les plus utilisées sont B500A et B500B.

- **Limite d'élasticité (R_e)**: il s'agit de la contrainte marquant la limite entre les domaines élastique et plastique de l'acier lors d'un essai de traction. Dans le domaine élastique, la déformation de l'acier est réversible et proportionnelle à la charge. Dans le domaine

plastique, elle est irréversible. En France, les aciers utilisés pour la construction de bâtiments en béton armé ont une limite d'élasticité courante de 500 MPa.

- **Résistance à la traction (R_m)**: elle représente la contrainte admissible selon le type d'acier. Au-delà, il y a rupture de l'acier.

- **Allongement (A_{gt})**: il exprime, en pourcentage, la déformation relative maximale admissible d'un acier avant rupture.

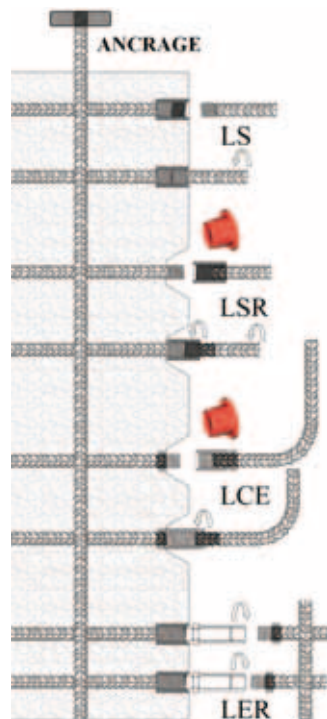
Liaisons Du recouvrement traditionnel aux solutions de raboutage

Les dispositifs de raboutage et d'ancrage sont mis en œuvre pour pallier des contraintes géométriques ou mécaniques. La liaison entre les barres d'armatures permet de transmettre les efforts et de faire redescendre les charges jusqu'aux fondations. De la qualité de leur réalisation dépend le bon fonctionnement de la structure. Le procédé traditionnel est le recouvrement. En mettant bout à bout deux barres d'acier, la transmission des efforts ne s'effectue pas. C'est pourquoi au niveau de la liaison, on réalise un recouvrement des barres, dont le minimum correspond en général à 40 à 50 fois le diamètre des barres. Mais ce chevauchement n'est pas toujours aisé. Le problème est récurrent sur les grands chantiers de construction, du fait des fortes densités d'acier mises en jeu notamment. En zone de forte sismicité, le recouvrement peut même être déconseillé. Pour transmettre les efforts, il convient alors de se tourner vers des liaisons mécaniques mettant en œuvre des solutions de raboutage ou d'ancrage à partir de manchons, coupleurs et autres dispositifs spéciaux. « En cas de séisme, n'importe quel coupleur sera toujours plus résistant qu'un recouvrement. La liaison mécanique sera en effet préservée, même si le béton est dégradé, ce qui n'est pas le cas du recouvrement qui a besoin du béton pour assurer le rôle de verrou », note Richard Boisson, directeur technique de la société Bartec.

Sur le marché, les produits sont généralement destinés à des armatures aux diamètres compris entre 12 et 56 mm. On distingue trois grandes familles de coupleurs ou manchons selon le type de fabrication. Le procédé par refoulement est aujourd'hui le plus utilisé. Il consiste à grossir l'extrémité des barres d'armatures à liaisonner par refoulement à froid du métal. Le renflement de la barre est ensuite fileté. Sa section filetée est supérieure à celle de la barre, ce qui confère à la liaison une résistance à la traction plus élevée que celle de la partie courante. Sur chantier, les barres sont reliées par un coupleur fileté, lequel peut être lisse ou en relief pour améliorer l'adhérence du béton. Les coupleurs ont l'avantage d'être compacts. « Pour éviter de créer des points durs dans le béton, on cherche à avoir des produits les plus courts possibles, dont le comportement soit proche de celui de la barre », remarque Richard Boisson.

Les systèmes de sertissage, axial ou longitudinal, consistent, eux, à sertir un coupleur sur chaque extrémité de la barre par une technique d'extrusion contrôlée. Se mettant en œuvre simplement à

l'aide d'une clé, ils nécessitent cependant deux pièces par liaison, l'une mâle, l'autre femelle, conduisant ainsi à une plus grande longueur du dispositif à l'intérieur du béton. La technique la plus ancienne est celle des coupleurs à filetage conique. Le filetage est directement réalisé sur l'extrémité des barres d'armatures. Le manchon est alors vissé sur les armatures. Pour s'assurer de la mise en œuvre du bon couple de serrage, il est essentiel d'utiliser une clé dynamométrique. Ces produits n'assurent pas la pleine résistance de la barre. La norme tolère leur rupture à 95% de la résistance de la barre. Enfin, les manchons à vis de pression sont surtout des dispositifs de réparation, utiles sur chantier lors d'une coupe non intentionnelle d'une armature de reprise. Ils sont en revanche plus encombrants. Les extrémités des armatures sont placées à l'intérieur du manchon puis verrouillées par vis de pression, le contrôle du serrage s'effectuant par la rupture des vis « fusibles ».



Des coupleurs pour toutes les configurations

Les coupleurs par refoulement à froid permettent de s'adapter aux différentes configurations de liaison : standard (LS) lorsque la barre de 2° phase tourne aisément ; sans rotation (LSR) lorsque cette même barre est lourde ou difficile à visser ; à contre-écrous (LCE) lorsqu'elle ne tourne pas ; et à écartement réglable (LER).



Utilisés sur les grands chantiers de construction ou les zones de forte sismicité, les coupleurs se substituent au recouvrement traditionnel des armatures.

(●●●) ture sur la base de l'Eurocode 2, complété de l'Eurocode 8 lorsque la construction est soumise aux règles parasismiques. Comme l'explique Jean-Michel Sohm, « les Eurocodes définissent deux calculs aux états limites. Le premier est celui à l'état limite de service [ELS], qui correspond à ce que vit un bâtiment tous les jours et consiste à vérifier que l'acier travaille nettement en dessous de sa limite d'élasticité de 500 MPa. Le second est un calcul à l'état limite ultime [ELU]. Au-delà, le bâtiment peut être dégradé. Le dimensionnement selon l'Eurocode 8 consiste à vérifier qu'il ne va pas s'écrouler sur les occupants ».

Cependant, relève Hervé Tersen, « dans le cadre des anciennes règles BAEL, la répartition des armatures était réalisée à partir d'abaques. En fonction de la section d'acier calculée, celles-ci fournissaient : le nombre d'aciers, le type de barre, les cadres, la longueur des ancrages, etc. Avec le passage aux Eurocodes et l'évolution de la carte sismique qui a fait passer près d'un tiers du territoire français en zone de sismicité moyenne, le dimensionnement des armatures est devenu plus complexe. Les bureaux d'études doivent prendre en compte des paramètres plus nombreux, certains très précis, concernant le non-effritement du béton, l'exposition de l'ouvrage, le type de bâtiment, sa hauteur, etc. ».

Le décorticage des plans de structure : une étape essentielle

Si cette évolution permet une meilleure prise en compte des risques, elle conduit également à une multiplication des types d'armatures et à des prescriptions parfois irréalisables. Pourtant, comme le rappelle Jean Ditrichstein dans son ouvrage (*lire Pour en savoir plus*

Reprises de bétonnage Le recours aux boîtes d'attente se généralise

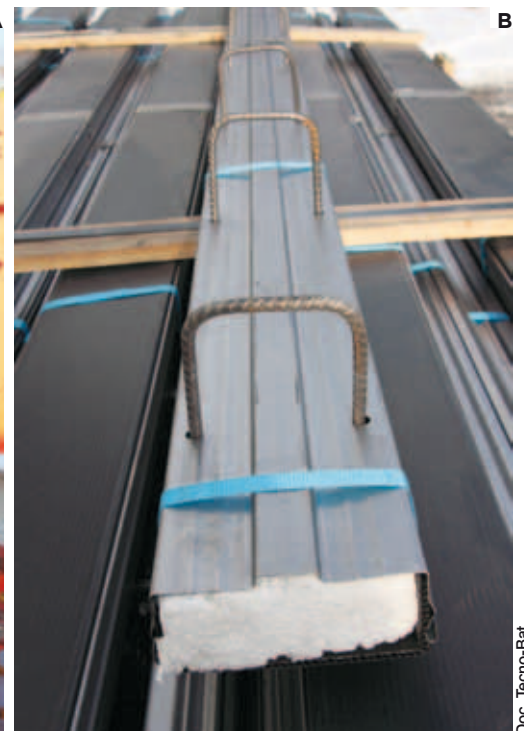
Depuis les premières mises en œuvre dans les années 1970, les boîtes d'attente se sont généralisées sur les chantiers de construction, où elles facilitent de nombreuses reprises de bétonnage horizontales ou verticales. La fonction d'une boîte d'attente est d'assurer la continuité des armatures au niveau des arrêts de bétonnage. Comme l'explique Dominique Galais, responsable de site chez Techno-Bat, « c'est une réservation en métal, plastique ou bois, dans laquelle sont incorporés des aciers pliés. La boîte est positionnée sur la face intérieure du coffrage du premier voile. Elle devient visible après le coulage du béton et le décoffrage. Il suffit alors de l'ouvrir et de déplier les armatures afin de procéder au coulage du mur ou du plancher venant en raccordement ». Dans le bâtiment, l'utilisation des boîtes

d'attente a permis de soigner les performances et la propreté de liaisons, tout en évitant le laborieux percement des coffrages ainsi que leur perte. « Elle a également limité les défauts d'alignement et d'étanchéité. Auparavant, pour réaliser la liaison entre un mur et un plancher, il fallait s'arrêter sous le niveau du plancher ; le réglage était imparfait. Aujourd'hui, on arrête le coulage du mur au-dessus du niveau du plancher », souligne Dominique Galais. Ces produits sont fabriqués sur mesure par des sociétés spécialisées, telles que Techno-Bat, la Snaam ou Plakabéton, en fonction des prescriptions des BET structure qui portent sur le nombre d'aciers à incorporer, leur espacement, leur longueur, ou encore leur diamètre. Les boîtes respectent les règles de calcul des ancrages, des recouvrements, mais

aussi les nouvelles règles parasismiques qui conduisent à des dimensionnements spécifiques, avec des reprises pouvant atteindre 60, voire 75 fois le diamètre nominal de la barre d'acier. Selon les gammes, la longueur d'une boîte d'attente varie de 1 à 2,40 m. Sa largeur comprise entre 4 et une vingtaine de centimètres dépend de l'épaisseur de l'élément en béton.

Les produits sont couverts par la certification Afcab-Boîtes d'attente. De nouvelles recommandations professionnelles sont attendues au début de l'année pour encadrer leur utilisation à la jonction des voiles et des prédalles suspendues (systèmes liaison plancher à prédalle et voile avec engravure, LPPVE). Celle-ci avait été interdite en zone sismique en raison du manque de précision liée à leur positionnement.

Sur chantier, les boîtes d'attente sont incorporées dans les coffrages avant la première phase de bétonnage. Ici, (photo A) un système LPPVE pour lequel une recommandation est en cours de rédaction.



p. 30), « 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 ».

Pour obtenir une armature conforme et aisément réalisable, un travail de décortilage est assuré en interne par les fabricants d'armatures. Il consiste à analyser les plans de coffrage et de ferrailage fournis par le BET structure pour les transformer en ordres de production,

en ayant décomposé les armatures en autant de constituants à assembler.

Cette étape est essentielle : les plans de structure laissent parfois apparaître des impossibilités géométriques, liées, par exemple, à une densité d'acier incompatible avec la mise en place des cadres transversaux ou avec les règles d'enrobage. C'est le cas quand trois barres de 20 mm de diamètre sont prévues dans un encombrement inférieur à 65 mm. En effet, l'encombrement réel d'une barre de 20 mm est proche de 22 ou (●●●)

POINT DE VUE **Mouloud Behloul**, directeur innovation chez Lafarge France

« Le béton de fibres est plus facile à fabriquer »



Doc. Lafarge

« Les premières recherches sur les bétons de fibres ont été menées par des universitaires dans les années 1970. L'idée était de remplacer une partie des armatures traditionnelles par des fibres métalliques mesurant environ 30 mm de longueur et 1 mm de diamètre. Certes, il n'y a pas mieux qu'une armature bien placée pour reprendre les efforts, mais un béton de fibres est plus facile à fabriquer. De plus, les fibres sont partout dans le béton et reprennent des contraintes dans toutes les directions, ce qui s'avère très utile dans certaines applications. Dans les chapes, par exemple, l'utilisation de fibres métalliques ou synthétiques, en polypropylène, d'une résistance à la traction de 800 à 1 000 MPa, permet de reprendre les efforts locaux, gagner en finesse et, dans certains cas, limite la fissuration au jeune âge. En maison individuelle, des fibres plus résistantes – de l'ordre de 1 200 MPa – entrent dans la fabrication de massifs de fondation ou de fondations superficielles. Elles autorisent des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton armé standard moyennant un coût moindre. Le béton de fibres évite alors de devoir gérer deux fournitures, l'armature d'une part, et le béton de l'autre. C'est un produit

deux en un, livré en une seule fois sur chantier au moyen d'une toupie. Les fibres sont également présentes dans les applications non structurales des bétons fibrés à ultra-hautes performances [BFUP], les applications structurales faisant pour leur part appel aux armatures précontraintes. Dans ces bétons de résistance à la compression comprise entre 150 et 200 MPa, les fibres assurent la reprise des efforts de flexion et de cisaillement ; elles permettent de gagner en finesse en s'affranchissant des armatures. Un panneau de façade en Ductal ne mesure que 20 mm d'épaisseur, contre 55 mm minimum pour l'ouvrage en béton armé le plus fin, respectant les règles d'enrobage. Les fibres peuvent être métalliques ou organiques, par exemple en plastique APV [alcool polyvinylique]. En façade, pour des questions esthétiques, on préfère les fibres organiques aux fibres métalliques dont les pics parfois visibles à la surface du béton corrodent et créent autant de petits points de rouille. Dans le Ductal, les deux types de fibres ont une longueur de l'ordre de 12 mm et un diamètre de 0,2 mm. Leur résistance à la traction atteint 2 000 MPa, avec la possibilité d'aller jusqu'à 2 800 MPa. »

(•••) 24 mm. Dans d'autres cas, il est demandé une précision de 1/10 mm que les outils de production ne garantissent pas.

Le décorticage rationalise également la fabrication. Ainsi, lorsque les aciers de répartition sont prévus avec une distribution dite « en accordéon », l'entreprise pourra proposer une répartition plus homogène. De même dans le cas d'une demande de crosse avec des rayons de cintrage différents à chaque extrémité : une solution avec un seul cintrage, plus facile à effectuer, sera proposée. En atelier, la préparation d'une barre avec des crosses de différents cintrages est deux fois plus longue. Au lieu de plier les deux extrémités de la barre dans la même séquence de fabrication, il faut changer le diamètre de la machine plieuse et réaliser l'opération en deux temps. Dans tous les cas, les modifications apportées aux armatures devront être obligatoirement validées par le BET.

Enfin, la fabrication des armatures passe par une phase de préparation au cours de laquelle les aciers sont coupés à longueur, façonnés par pliage ou cintrage sur des cadreuses ou des cintruses. Les éléments sont ensuite assemblés sur une table de montage pour réaliser les cages d'armatures spécifiques de poutres, poteaux, voiles, fondations, etc. L'assemblage s'effectue le plus souvent en atelier, où les conditions sont optimales pour améliorer la qualité et les rendements de production. Le soudage des aciers vise à ce que l'armature puisse supporter plusieurs manipulations, il n'a pas de fonction mécanique comme dans le treillis soudé.

Lorsque l'assemblage est réalisé sur chantier, dans le cas notamment de grands radiers, les aciers sont ligaturés avec du fil de fer. C'est également avec des ligatures, des cales et des écarteurs que les cages d'armatures sont maintenues en place dans les coffrages pour assurer le respect de l'enrobage avant le coulage du béton. *Virginie Pavié*

Les certifications Afcab

Créées dans les années 1990 pour apporter des garanties de qualité sur le processus de fabrication des armatures du béton, les principales certifications délivrées par l'Afcab s'effectuent sur la base d'une démarche volontaire.

- La marque Afcab NF-Aciers pour béton armé porte sur les barres, couronnes et treillis soudés destinés à la fabrication d'armatures du béton armé.
- La marque Afcab NF-Armatures certifie la conformité des armatures à la norme NF A 35-027, dont la révision devrait être homologuée au 25 décembre, et la conformité des treillis raidisseurs à la norme NF A 35-028. L'utilisation d'acier certifié Afcab ou équivalent fera partie du DTU 21-Fascicule 65 en cours de révision.
- La marque Afcab-Boîtes d'attente pour béton armé.
- La marque Afcab-Dispositifs de raboutage ou d'ancrage des armatures du béton.
- La marque Afcab-Pose des armatures du béton.

Pour en savoir plus

Association française de certification des armatures du béton (Afcab) : www.afcab.org

Association professionnelle des armaturiers (APA) : www.apa.fr

« L'armature du béton », T46 de Jean Ditrichstein, collection technique Cimbéton : www.infociments.fr