

Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art

Annexe A-6
Evolution des armatures de béton armé





Rédaction

Daniel POINEAU

Ex-Sétra

Jean-Michel LACOMBE

Cerema Infrastructures de transport et matériaux

Relecteurs

Laurent LABOURIE

Cerema Nord Picardie

Jean-Christophe CARLES

Cerema Méditerranée



Préambule

Ce document constitue une annexe électronique au guide Cerema de 2015

« Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art ».



Sommaire

Préambule	3
Sommaire	4
Introduction.....	6
1 - Généralités	8
2 - Évolution des méthodes de contrôle des armatures de béton armé	9
3 - Les caractéristiques des différents types d'armatures de béton armé à prendre en compte lors d'un recalcul	10
3.1 - <i>Liste des fiches d'agrément ou d'homologation des armatures de béton armé des années 1968 aux années 1986</i> :	16
3.2 - <i>Courbe déformations–contraintes</i>	16
3.3 - <i>Soudabilité des armatures</i>	17



Page laissée blanche intentionnellement



Introduction

L'évaluation structurale d'un ouvrage nécessite de connaître les caractéristiques mécaniques des différents matériaux utilisés pour sa construction. Les développements et les références ci-après fournissent des informations sur les évolutions des propriétés mécaniques et des modalités de caractérisation et de contrôle des armatures de béton armé et ce depuis la fin du 19^{ème} siècle.



Page laissée blanche intentionnellement





1 - Généralités

Aux débuts du béton armé, à la fin du 19^{ème} siècle, chaque constructeur avait son procédé et ses dispositions constructives (par exemple, Hennebique utilisait des étriers en fer plat de 25 à 30 mm de largeur, d'autres enrobaient des profilés tels les IPN comme armatures, etc.). La limite d'élasticité des aciers employés était de l'ordre de 20 kgf/mm² voire plus.

Puis, relativement rapidement, seules les armatures en acier doux (acier de limite élastique de 24 kgf/mm² pour les ponts) et lisses furent employées sous forme de ronds et ce jusque vers les années 1950 où les premières barres à haute adhérence firent leur apparition.

Il faut attendre l'année 1940 pour voir s'imposer la normalisation des diamètres des armatures de béton armé (série normalisée : 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 25, 32 et 40). Précédemment à peu près tous les diamètres étaient fabriqués (2, 3, 5...11, 12, 13, 14, 15, 16, 17...24...31...36, 37...40).

Cependant, durant la période 1940 à 1950, la pénurie en matières premières, conduisit les constructeurs à utiliser des aciers de récupération (vieux rails, barres de section carrée, profilés, armatures de diverses origines trouvées en Allemagne, etc.). Les ponts construits durant cette période doivent faire l'objet d'investigations pour déterminer les caractéristiques mécaniques des armatures avant tout recalcul (limite d'élasticité, module d'élasticité, allongement à rupture, soudabilité, etc.).

Jusque vers les années 1950-1960, les dispositions constructives utilisées étaient différentes des dispositions actuelles. Il y a lieu de noter :

- les armatures des âmes de poutres sont constituées par une série d'étriers non réunis en partie basse par une épingle ou mieux un cadre de talon ;
- l'utilisation de barres relevées même dans les dalles de couvertures et les dalles de trottoir ;
- l'absence d'armatures de peau pour lutter contre la fissuration par retrait différentiel en particulier sur les faces latérales des poutres et dans les parties comprimées des pièces fléchies (sous face des dalles par exemple) ;
- l'utilisation de frettes sous forme de spirales hélicoïdales en ronds lisses de faible diamètre (de 2 à 8 mm) pour admettre des contraintes de compression plus élevées dans le béton (0,6 N₉₀ au lieu de 0,28 N₉₀, avec N₉₀ la résistance du béton en compression moyenne à 90 jours d'âge) ;
- un enrobage minimum pour les armatures d'âme n'était pas imposé par les règles de conception et de calcul ;
- la construction de nombreux ponts de type cantilever plus faciles à calculer que les ponts à poutres continues ;
- l'absence de chape d'étanchéité, le béton comprimé est considéré comme étanche.

A partir des années 1950, les armatures à haute adhérence dont les limites élastiques variaient de 40 à 50 kgf/mm² ont été utilisées. Elles ont remplacé comme armatures principales les ronds lisses qui ont continué à être utilisés comme armatures de montage, armatures secondaires, etc.

Il y a lieu d'être attentif lors du recalcul des ponts construits pendant la période 1958-1978 car les limites élastiques des armatures à haute adhérence dépendaient à la fois du diamètre de la barre et du fabricant (se reporter au tableau ci-après).

Il faut également se rappeler que les barres en acier de classe Fe E 500 MPa n'ont commencé à remplacer les barres Fe E 400 que depuis les années 1985.

Il faut se rappeler enfin qu'avec le BAEL lorsque la fissuration était considérée comme peu préjudiciable, la vérification des armatures se faisait uniquement à l'ELU. Pour éviter une fissuration excessive, les règles de calcul ont imposé de considérer les aciers de classe 500 comme des aciers de classe 400 afin de limiter le taux de travail des armatures à l'ELS aux environs de 280 – 300MPa. Il est donc possible de bénéficier d'une certaine réserve à l'ELU sur les ponts qui ont été conçus en respectant cette règle.

2 - Évolution des méthodes de contrôle des armatures de béton armé

Lors du lancement des armatures à haute adhérence, la Commission d'Agrément des Règles BA 60 s'est substituée provisoirement au Ministère des Travaux Publics et son Cahier des Charges. En 1966, a été créée la Commission Ministérielle d'Agrément et de Contrôle des aciers pour béton armé. Cette Commission a été remplacée en 1983 par une Commission Interministérielle. Depuis 1993, l'AFCAB (Association Française de Certification des Armatures des Bétons), certifie la conformité des armatures de béton armé à la marque NF.

Jusqu'aux années 1960, les armatures lors de leur réception devaient avoir une limite d'élasticité supérieure ou égale à la valeur garantie.

Ensuite, méthodes de la statistique ont commencé à être utilisées. Les producteurs garantissaient soit la valeur minimale du caractère soit les paramètres de distribution statistique de ce caractère (pas plus de 0,5 % d'essais en dessous de la valeur garantie).

Par exemple, pour la limite élastique, la valeur garantie f_{eg} sur un grand nombre d'essais était donnée par la relation suivante :

$$f_{eg} = f_{em} - 2 s$$

Avec : f_{em} la résistance moyenne et s l'écart quadratique moyen.

Un lot d'armatures était déclaré conforme si les résultats sur 5 essais étaient supérieurs à f_{eg} . Sinon, 5 nouveaux essais étaient effectués et ajoutés aux résultats précédents pour obtenir f_{em1} et s_1 . Pour que le lot soit accepté il fallait vérifier que : $f_{em1} - 1,8 s_1 \geq f_{eg}$

Ces règles ont été reprises par le titre 1^e du fascicule 4 du CPC. Rendu obligatoire par le décret 67-856 du septembre 1967.

La circulaire 76-64 du 3 mai 1976 relative à l'agrément et au contrôle en usine a modifié les règles précédentes. La probabilité d'avoir un résultat d'essai inférieur à la valeur de référence devait être au plus égale à 5 %.

La demande d'agrément portait sur 60 essais répartis sur 10 lots de production. Il devait être vérifié :

$$f_{em} - 2 s \geq f_{eg} \text{ (valeur garantie)}$$

Pour satisfaire un autocontrôle sur 3 essais par lot, il devait être vérifié :

$$f_{ei} \geq f_{emin}$$

Avec f_{emin} , la valeur minimale ou borne inférieure $f_{emin} = f_{eg} - 20 \text{ à } 30 \text{ MPa}$.

Dans le cas où cette condition n'était pas satisfaite, des essais complémentaires devaient être réalisés portant le nombre des prélèvements à 12 et il devait être vérifié :

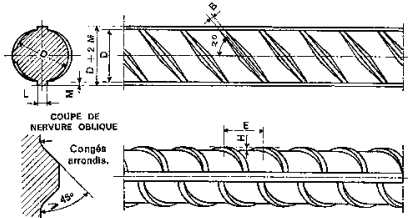
$$f_{em1} - 2s_1 \geq f_{emin}$$

Enfin, le titre 1^{er} du fascicule 4 du CCTG relatif à l'homologation et au contrôle en usine et rendu obligatoire par le décret 83-251 du 29 mars 1983 a légèrement modifié les dispositions précédentes. Les valeurs spécifiées du caractère f_e ont été fixées par les normes NF A 35-015, 35-016 et 35-019 et renommées R_e et $R_{po,2}$. La borne inférieure a été fixée à la valeur spécifiée diminuée de 20 MPa.

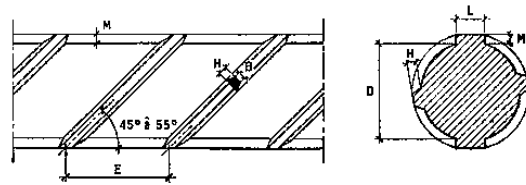


3 - Les caractéristiques des différents types d'armatures de béton armé à prendre en compte lors d'un recalcul

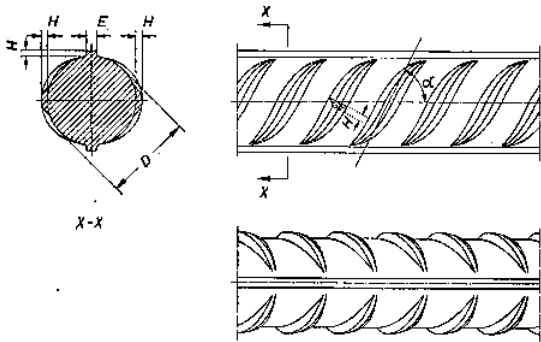
Les figures et photos qui suivent donnent les caractéristiques géométriques de divers aciers à haute-adhérence.



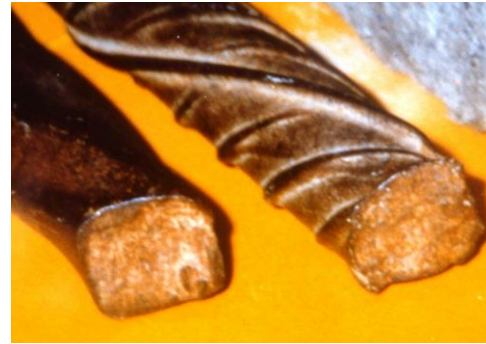
acier Breteuil 1961



Acier Creloi 1961



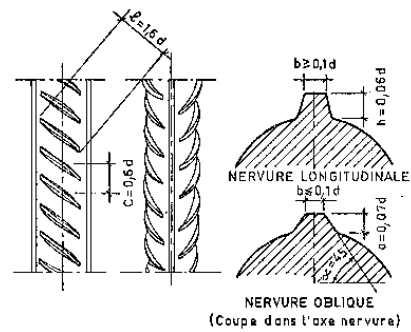
acier Hi-Bond A 1961



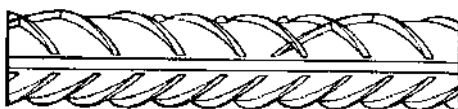
aciers Caron et Tor 1961



acier Tentor 1961



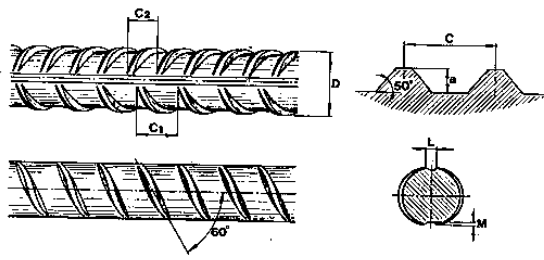
acier Super Rodurac 1971



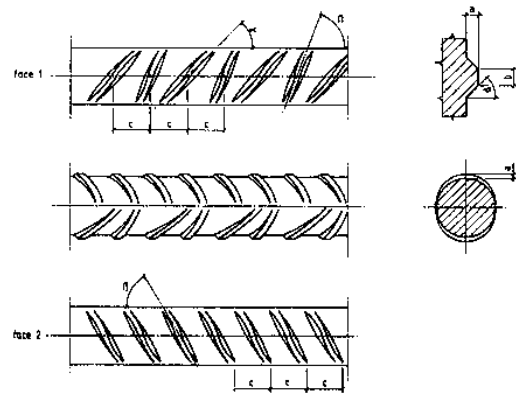
acier Torsid 1981



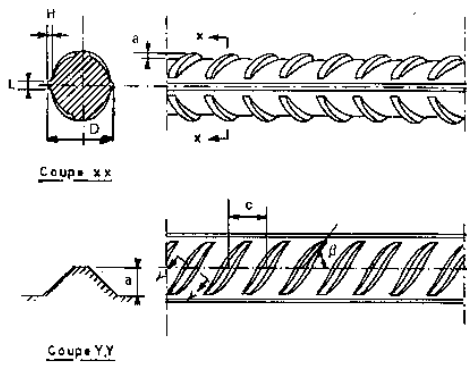
marques de laminage acier Alpen 400



acier Welbond 1986



Acier Creloi 500 S 1986



acier Ols 400 1986

Le tableau ci- après donne les principales caractéristiques des aciers pour béton armé utilisés depuis les années 1900.



Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement A rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations	
De 1900 à 1958 environ	Article 30 du cahier des charges générales de 1913 modifié à diverses reprises	<u>Ronds lisses</u> Ac 42	24 kgf/mm ²	42 à 50 kgf/mm ²	25	/	/	Soudable, pliable et dépliable (à contrôler)	
		Ac 54	36 kgf/mm ²	54 à 64 kgf/mm ²	18	/	/	Ces aciers ont pu être utilisés dans des pièces fortement comprimées	
		<u>Ronds lisses</u> <u>Adx</u>	24 kgf/mm ² si φ < = 25mm 21 à 22 kgf/mm ² si φ > 25 mm	33 à 50kgf/mm ²	/	1	(*)	Non soudables, rarement utilisés dans les ponts	
		Ac 42	24 kg/mm ²	42 à 50 kgf/mm ²	25	1	(*)	Acier soudable normalement utilisés pour les ponts	
		<u>Aciers durs</u> Ac 55	32 kg/mm ²	55 à 65 kgf/mm ²	>16	1	(*)	Ces ronds lisses en acier mi-dur et dur ont pu être utilisés dans des pièces fortement comprimées	
		Ac 65	36 kgf/mm ²	65 à 85 kgf/mm ²	12	1	(*)		
		Ac 75	40 kgf/mm ²	>75 kgf/mm ²	6	1	(*)		
		Cahier des charges du 8 avril 1958	<u>Armatures HA en acier doux écroui</u>						(*) d'après le CCBA 68
		fiches d'homologation des aciers à haute adhérence des règles BA 60 éditées par la documentation technique du bâtiment et des travaux publics 9 rue Lapérouse 75 016 Paris)	Aciers Tentor (TT) soudable avec précautions	50 kgf/mm ²	58 kgf/mm	21	1,6	(*)	$\psi_s = \frac{1,5\eta_d}{\sqrt{2}}$
	Acier Tor (T) soudable avec précautions	42 kgf/mm ² si φ < = 20 40 kgf/mm ² si φ > 25 mm	48,5 kgf/mm ²	14	1,6	(*)			
	Acier Caron (C) soudable avec précautions	42 kgf/mm ² si φ < = 20 40 kgf/mm ² si φ > 25 mm	50 kgf/mm ²	14	1,6	(*)			



Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement A rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
	Note technique C 12 n°1 du SCET du 22/02/1964 sur les conditions d'utilisation des armatures HA non visés par les fiches BA 60 ci-après ::	<u>Armatures HA en acier naturellement dur</u> Acier crénelé	40 kgf/mm ²					Soudables ou non. Ne pas déplier et pliage délicat à basse température. Acier fabriqué jusqu'en 1959
	Fiches BA 60 N°1 du 4/1/61 N°2 du 4/1/61	Acier Nersid (N) non soudable	42 kgf/mm ² si $\phi < = 16$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > = 20$ mm	50 kgf/mm ² 48 kgf/mm ²	12	1,6	(*)	
	N°2bis du 2/2/65 N°3 du 4/1/61 N°3bis du 9/7/63	Acier Créloi (SE) non soudable	45 kgf/mm ² si $\phi = 8$ mm 42 kgf/mm ² si $\phi = 10$ et 12 mm 40 kgf/mm ² si ϕ de 14 à 25 mm	55 kgf/mm ² 50 kgf/mm ²	12		(*)	
	N°4 du 31/1/61 N°5 du 6/10/61 N°6 du 10/10/61	Acier Breteuil (BR) non soudable	42 kgf/mm ² si $\phi < = 16$ mm 39 kgf/mm ² si $\phi = 20$ à 25 mm	48 kgf/mm ² 58 kgf/mm ²	12	1,6	(*)	
	N° 7 du ? N°8 du 13/2/63 N°9 du 24/4/63	Fil Ardox 5400 (AX) non soudable	54 kgf/mm ²	56 kgf/mm ²	12	1,6	(*)	
		Acier Hi-Bond-A (HBA) soudable	42 kgf/mm ² si $\phi < = 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > = 25$ mm	63 kgf/mm ² 58 kgf/mm ²	20	1,6	(*)	
De 1966 à 1978	Aciers doux Normes NF A35-015 et 35-016 du 30/12/66	Fe E 22 (ex Adx)	22 kgf/mm ²	34 à 50 kgf/mm ²	22	1	1	
	Titre 1 ^{er} du fascicule 4 du CPC – Décret 67856 du 11/9/67 et circulaire n°71 du 26/10/66 Circulaire n°12 du 8 février 1968	<u>Ronds lisses</u> Fe E 18	Environ 18 kgf/mm ² non garantie	33 kgf/mm ²	18	/	/	Non utilisé pour les ponts car interdit
	Fascicule 65 du CPC annexé à la circulaire du 13/8/69	Fe E 24 (ex Ac42)	24 kgf/mm ²	42 à 50 kgf/mm ²	25	1	1	



Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement A rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
	Circulaire 76-64 du 3 mai 1976 relative à l'agrément et au contrôle des armatures à haute adhérence en acier pour béton armé	Fe E 34	34 kgf/mm ²	60 à 72 kgf/mm ²	16	1	1	
	Aciers HA	<u>Armatures HA</u> Fe E 40 A	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > 20$ mm	48,5 kgf/mm ²	14	1,6	1,5	Diamètres < 40
		Fe E 40 B (acier de relaminage)	42 kgf/mm ² si $\phi \leq 20$ mm 40 kgf/mm ² si $\phi > 20$ mm	48,5 kgf/mm ²	12	1,6	1,5	Mandrins de pliage > ceux des FeE 40 A
		Fe E 45	45 kgf/mm ²	52 kgf/mm ²	12	1,6	1,5	
		Fe E 50	50 kgf/mm ²	57,5 kgf/mm ²	10	1,6	1,5	
De 1978 à 1983	Aciers doux Nouvelles normes NF A 35-015 du 15/6/78 Nouvelles normes NF A 35-016 du 15/6/78 et NF A 35-019 et NF A 35-020 d'avril 80 (fils à haute adhérence)	<u>Ronds lisses</u>	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	Pas de changement par rapport à la période 67-78.
	Aciers HA	<u>Armatures HA</u> Fe TE 45	440 N/mm ²	480 N/mm ²	8	1,3 si $\phi < 6$ mm 1,6 si $\phi \geq 6$ mm	1,5	Introduction de 4 types d'armatures : 1 acier naturellement dur, 2 acier écrouis sans réduction de section, 3 acier écrouis avec forte réduction de section, 4 treillis soudés
		Fe TE 50	490 N/mm ²	540 N/mm ²	8	1,3 si $\phi < 6$ mm 1,6 si $\phi \geq 6$ mm	1,5	
De 1983 à 1995	Aciers doux Nouveau titre 1 ^{er} du fascicule 4 du CCTG annexé au décret 83-251 du 29/3/83	<u>Ronds lisses</u> Fe E215	215 N/mm ²	330 à 390 N/mm	22	1	1	Le nouveau fascicule fait référence aux normes pour les diamètres 6 à 40 mm



Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement A rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
	Création de la procédure d'homologation par le décret 83-252 du 29/3/83	Fe E 235	235 N/mm ²	410 à 490 ²	25	1	1	
	Aciers HA Nouvelles normes : NF A 35-015 du 20/7/84 NF A 35-016 du 30/12/86 NF A 35-019 du 20/7/84	<u>Aciers HA</u> Fe E 400 1 Fe E 400 2 Fe E 400 3	400 N/mm ²	440 N/mm ²	12 sur 5 d 12 sur 5 d 5 réparti	1,6	1,5	Les normes introduisirent 3 catégories 1, 2 et 3 et 3 paramètres de forme : - armatures à verrous transversaux obliques en croissant
	Création de l'AFCAB en 1993 (Association Française de Certification des Armatures pour Béton)	Fe E 500 1 Fe E 500 2 Fe E 500 3	500 N/mm ²	550 N/mm ²	12 sur 5 d 8 sur 5 d 5 réparti	1,6	1,5	- armatures torsadées à froid à verrous transversaux obliques en croissant - armatures à empreintes Diamètres de 6 à 40 mm.
		Fe TE 400	400 N/mm ²	480 N/mm ²	12 sur 5d	1,3 si $\phi > 6$ mm 1,5 si $\phi \geq 6$ mm	1,5	Introduction des 3 paramètres de forme : - à empreinte, - à verrous,
		Fe TE 500	500 N/mm ²	550 N/mm ²	8 sur 5 d	1,6	1,5	- à nervures continues Dans les diamètres 6 à 16 mm



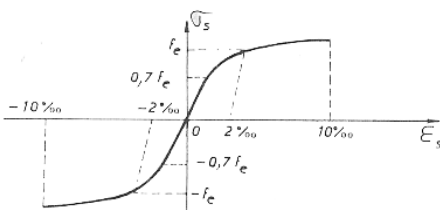
3.1 - Liste des fiches d'agrément ou d'homologation des armatures de béton armé des années 1968 aux années 1986 :

Décision ou circulaire	Date	Observations
N° 1	25 juin 1968	
N° 2	20mars 1969	
N° 3	12 janvier 1970	
N° 4	21 mai 1970	
N° 5	28 avril 1970	
N° 9	30 décembre 1971	
N° 14	30 novembre 1972	
N° 15	20 juillet 1973	
N° 16	17 mai 1974	
N° 21	19 février 1975	
N° 22	18 juillet 1975	
N° 76-132	11 octobre 1975	Incidences de la circulaire 76-64 du 3 mai 1976
N° 77-72	du 6 mai 1977	
N° 78-73	10 mai 1978	
N° 78-90	27 juin 1978	
N° 79-46	21 mai 1979	
N° 80-82	26 juin 1980	
N° 81-33	10avril 1981	
N° 82-51	du 24 mai 1982	
N° 86-15	13 février 1986	
N° 86-35	17 avril 1986	

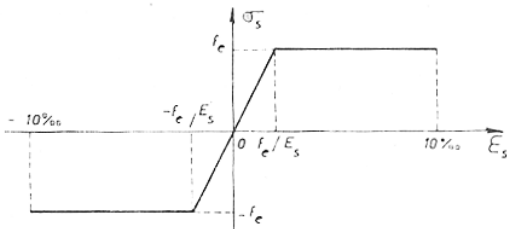
3.2 - Courbe déformations–contraintes

Les diagrammes déformations (ε_s) contraintes (σ_s) des aciers naturellement durs ou très fortement écrouis (aciers Breteuil, Créloi, Nersid, etc.) désignés par le sigle Fe E40 B sont élasto-plastiques parfaits alors que ceux des aciers doux écrouis par traction ou torsion (aciers Caron, Tor, Tentor, etc.) désignés par le sigle Fe E40 A sont curvilignes

Pour les aciers écrouis, le diagramme de l'article A.2.2 du BAEL 80 est :



Pour les autres aciers, le diagramme des BAEL 80, 83, 91 et 99 figure ci-dessous.



3.3 - Soudabilité des armatures

Titre 1^{er} du fascicule 4 du CPC du 11 septembre 1967 et circulaire n° 12 du 8 février 1968 .

Ce texte donne des indications sur la soudabilité des armatures de béton armé :

Un acier de béton armé peut être considéré comme soudable si la soudure peut se faire soit par résistance soit à l'arc avec des électrodes enrobées.

- aciers doux :
 - les aciers doux sont aptes à la soudure bout à bout par étincelage,
 - les aciers de classe Fe E24 sont garantis soudables à l'arc.
- les aciers à haute adhérence :
 - la fiche d'identification de chaque produit indique si celui-ci est soudable et dans quelle condition,
 - lors du soudage d'acier écrouis, il y a lieu de ne pas ruiner l'écrouissage par une élévation de température excessive ;
 - les aciers relaminés ou à haute teneur en carbone (aciers naturellement durs) ne sont pas considérés comme soudables.

Circulaire N°76-64 du 3 mai 1976 relative à l'agrément et au contrôle des armatures à haute adhérence en acier pour béton armé :

Ce document précise les conditions de réalisation des essais de soudabilité :

- soudure bout à bout par étincelage ;
- soudage à l'arc électrique ;
- soudage par chauffage à la flamme et pression ;
- soudage en croix.

Titre 1^{er} du fascicule 4 du CPC annexé au décret N° 83-252 du 29 mars 1983.

Ce texte fait un large recours aux normes, donne également des indications sur la soudabilité des armatures de béton armé :

- aciers doux :
 - les aciers de classe Fe E22 ne sont pas garantis aptes au soudage,
 - les aciers de classe Fe E24 sont garantis aptes au soudage à l'arc.
- les aciers à haute adhérence :
 - la fiche d'identification de chaque produit indique si celui-ci est soudable et dans quelle condition.

Résumé

Ce document constitue une annexe électronique au guide Cerema de 2015.

« Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art ».

Il traite de l'évolution des armatures de béton armé.

Aménagement et développement des territoires, égalité des territoires - Villes et stratégies urbaines - Transition énergétique et changement climatique - Gestion des ressources naturelles et respect de l'environnement - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Gestion, optimisation, modernisation et conception des infrastructures - Habitat et bâtiment

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.

*En cas de reproduction partielle, l'accord préalable de l'auteur devra être demandé
Référence : 1749w – ISRN : CEREMA-DtecITM-2017-049-1-FR*

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction technique infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris, 77171 Sourdun - Tél. : +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public - Siret 130 018 310 00016 - www.cerema.fr