

Solutions béton

Un nouveau concept d'armatures

P. 2

Caractéristiques des aciers plats

P. 3



Les aciers plats (Eco-Steel®), pour des ouvrages à plus faibles impacts environnementaux

Pourquoi ne pas utiliser des aciers plats ? Quels pourraient être les avantages et les inconvénients des aciers plats ? Pourquoi ne pas disposer de verrous pour aussi améliorer l'adhérence ? Pourquoi ne pas réaliser les verrous avec des pas variables pour forcer les fissures à se produire selon un pas donné ? Autant de questions que s'est posées Marcel Matière, « le perpétuel innovateur ».

Résultat, une innovation pour la réalisation d'ouvrages en béton armé, qui permet de diminuer les quantités d'armatures de béton et donc de réduire leurs impacts environnementaux.

Texte : Henry Thonier et Patrick Guiraud

Un nouveau concept d'armatures



→ Essai de chargement, montrant la ductilité des éléments en béton armé de plats crantés.



→ Ferrailage d'un dalot avec aciers plats lisses en période d'expérimentation.

UN PEU D'HISTOIRE

Le béton armé a été inventé et utilisé au milieu du XIX^e siècle, d'abord avec une barque réalisée par Joseph Lambot en 1848 (et dont deux exemplaires existent encore), puis avec des caisses de jardin par Joseph Monnier. L'idée d'alors était de remplacer des ouvrages en bois par des ouvrages imputrescibles. Les armatures utilisées à l'époque provenaient de ce que l'on trouvait sur le marché : des plats lisses en acier doux.

Pour répondre au développement des constructions en béton armé grâce à Edmond Coignet, Armand Considère, François Hennebique... à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, les sidérurgistes ont créé des aciers lisses propres à l'usage du béton armé, plats d'abord, puis ronds jusqu'à la fin des années 1950. L'adhérence entre l'acier et le béton, d'abord niée par des précurseurs du béton armé tels que Paul Cottencin (1889), a ensuite été améliorée par un changement de forme, avec des aciers torsadés (Caron), puis par la réalisation de reliefs en surface des armatures (aciers Tor, Tentor, Nersid).

Depuis de nombreuses années, sont utilisées quasi exclusivement des armatures de section circulaire profilées à froid ou laminées à chaud comportant des reliefs (verrous) ou des creux (empreintes).

UN NOUVEAU CONCEPT

Un nouveau concept a été imaginé ces dernières années par Marcel Matière. Il s'agit d'aciers plats, crantés, soudables à adhérence variable (norme XP A 35-026).

Sa mise au point s'est faite progressivement en deux temps :

- d'abord en validant les avantages apportés par la géométrie de forme des aciers plats par rapport aux aciers ronds ;
- puis en optimisant la géométrie de surface de l'acier et les conditions d'adhérence de forme : aciers plats lisses, puis aciers plats avec crantage avec des pas réguliers de verrous ou avec des pas variables. ■



→ Ferrailage d'un dalot.

« Le fer résistant à l'extension et le béton à la compression, on constitue par la combinaison de 2 matières un ensemble homogène dans d'excellentes conditions. »

Coignet : 1889

AVANTAGES DES ACIERS PLATS

Simplicité de conception des cages d'armatures :

- aciers plats plus faciles à cintrer : mandrin plus petit, moindre inertie ;
- encombrement réduit dans le plan parallèle au petit côté du plat ;
- suppression des crosses d'extrémité par utilisation de vrilles.

Dimensionnement et durabilité optimisés :

- enrobage à l'axe plus faible d'où un plus grand bras de levier ;
- meilleur rapport périmètre sur section d'où une meilleure résistance au glissement acier-béton ;
- fissuration corrosive n'apparaissant que sous plus fortes charges ;
- grande ductilité : plus grande absorption d'énergie en sollicitations sismiques ;
- contrôle de la fissuration par alternance de zones crantées et de zones lisses.

Économie de béton et d'acier :

- bras de levier plus grand ;
- limite élastique 550 MPa ou 600 MPa au lieu de 500 ;
- longueur d'ancrage diminuée de 25 % ;
- meilleur ajustement des quantités d'acier par rapport aux aciers strictement nécessaires déterminés par le calcul.

Plus faible empreinte environnementale des ouvrages :

- gain sur les quantités de béton et d'acier ;
- réduction des impacts environnementaux ;
- amélioration du bilan carbone.

Caractéristiques des aciers plats



Fig. 1 – Adhérence de forme par la réalisation de verrous obtenus par laminage.

Adhérence de forme des aciers plats

Elle est obtenue par la réalisation de verrous (fig. 1) semblables à ceux des aciers ronds.

Le respect des dimensions des verrous (crantage), conformément à la norme *NF EN 10080* et à la norme expérimentale *XP A 35-026*, permet de prendre en compte la même contrainte d'adhérence du béton.

Nota : Une bonne adhérence de forme peut aussi être obtenue par vrillage d'une extrémité pour assurer un ancrage.

Des essais ont montré qu'un vrillage à 90° assurait un ancrage total d'une barre plate crantée.

Comme le périmètre rapporté à la

section est plus grand avec des barres plates qu'avec des barres rondes (fig. 2), la longueur d'ancrage, pour un même effort à transmettre, est plus faible avec des aciers plats.

Compte tenu du respect des critères dimensionnels des verrous et empreintes conformément à la norme *NF EN 10080*, les longueurs d'ancrage sont à calculer suivant l'équation (8.2) de l'Eurocode 2 (*NF EN 1992-1-1*):

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (8.2)$$

en retenant un coefficient $\eta_1 = 1$ dans les bonnes conditions d'adhérence ou $\eta_1 = 0,7$ en conditions d'adhérence médiocres.

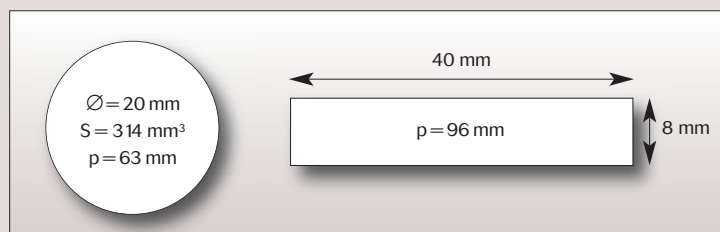


Fig. 2 – Surface d'adhérence à section identique.

Tableau 1

Longueur d'ancrage	Exemple 1		Exemple 2	
	Rond Ø 8	Plat 17 x 3	Rond Ø 16	Plat 35 x 6
Type d'armatures				
Section cm²	0,50	0,51	2,01	2,10
ρ	$\frac{2 \times 3}{8} = 0,75$		$\frac{2 \times 6}{16} = 0,75$	
Pour $f_{bd} = 2,7$ MPa et $f_{yd} = 435$ MPa	$L_{b,r} = 40 \varnothing$	$L_{b,p} = 80 b$	$L_{b,r} = 40 \varnothing$	$L_{b,p} = 80 b$
L_q	$40 \times 8 = 320$ mm	$80 \times 3 = 240$ mm	$40 \times 16 = 640$ mm	$80 \times 6 = 480$ mm

Le coefficient η_2 est pris égal à 1, les dimensions transversales des aciers plats ne justifiant pas de diminuer cette valeur.

Les résultats d'essais d'arrachement (*pull-out*) montrent que la longueur d'ancrage correspondant à la rupture d'adhérence est au moins aussi bonne que celle de barres rondes. Provisoirement et à titre de sécurité, on retiendra le même coefficient 2,25 pour l'expression (8.2).

Des essais ultérieurs pourraient permettre de modifier éventuellement cette valeur à la hausse.

La longueur d'ancrage des aciers ronds est donnée par :

$$\frac{\pi \varnothing^2}{4} f_{yd} = \pi \varnothing \cdot L_{b,r} \cdot f_{bd}$$

ce qui donne :

$$L_{b,r} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

et pour un acier plat de grand côté a

et de petit côté b :

$$a \cdot b \cdot f_{yd} = 2a \cdot L_{b,p} \cdot f_{bd}$$

d'où :

$$L_{b,p} = \frac{b}{2} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{bd}}$$

On en tire le rapport :

$$\rho = \frac{L_{b,p}}{L_{b,r}} = \frac{2b}{\varnothing}$$

À section égale, la longueur d'ancrage est diminuée de 25 % pour un acier plat (tableau 1).

Encombrement des armatures transversales

Les armatures transversales destinées à reprendre l'effort tranchant n'ont pas besoin d'entourer les armatures principales longitudinales. Il suffit qu'elles leur soient liées, par une soudure par exemple (fig. 3).

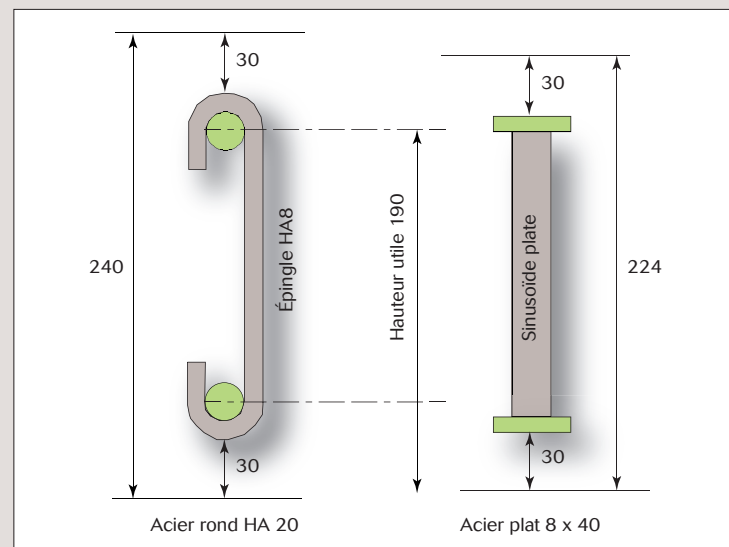


Fig. 3 – Encombrement des épingles.

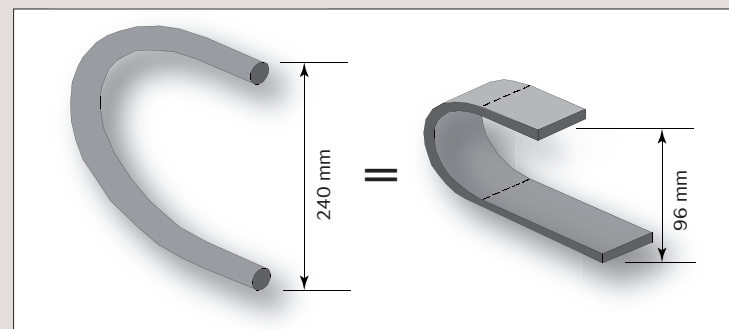


Fig. 4 – Encombrement des crochets.

Diamètres de cintrage et encombrement des crochets

La condition de non-détérioration de l'acier du tableau (8.1) de l'Eurocode 2 conduit, pour des diamètres ou épaisseurs de plats inférieurs à 16 mm, à respecter la condition du tableau suivant pour le diamètre de cintrage (tableau 2).

Pour respecter la condition de non-écrasement du béton, le diamètre de cintrage doit satisfaire l'équation (8.1) de l'Eurocode 2 (tableau 3).

Tableau 2

Diamètre de cintrage \varnothing_m	Barres rondes HA de diamètre \varnothing	Barres plates crantées a x b (a > b)
		$\varnothing_m \geq 4\varnothing$
Exemple pour une section équivalente d'acier	$\varnothing 14 = 154 \text{ mm}^2$	$30 \times 5 = 150 \text{ mm}^2$
	$\varnothing_m = 4 \times 14 = 56 \text{ mm}$	$\varnothing_m = 4 \times 5 = 20 \text{ mm}$

Tableau 3

Diamètre de cintrage	Barres rondes HA de diamètre \varnothing	Barres plates crantées a.b (a > b)
Eq. 8.1	$\varnothing_m \geq \frac{F_{bt}}{f_{cd}} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\varnothing} \right)$	$\varnothing_m \geq \frac{F_{bt}}{f_{cd}} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2a} \right)$
	$\varnothing = 14 \text{ mm}$	$a.b = 30 \times 5$
Exemple pour une section équivalente d'acier, un même enrobage à l'axe, pour un effort à ancrer $F_{bt} = 67 \text{ kN}$ et un béton C25/30 ($\sigma_{sd} = 435 \text{ MPa}$, $a_b = 30 \text{ mm}$, $f_{cd} = 16,7 \text{ MPa}$)	$\varnothing_m \geq \frac{0,067}{16,7} \left(\frac{1}{0,03} + \frac{1}{2 \times 0,014} \right) = 0,277 \text{ m} = 20 \varnothing$	$\varnothing_m \geq \frac{0,067}{16,7} \left(\frac{1}{0,03} + \frac{1}{2 \times 0,03} \right) = 0,200 \text{ m} = 40 b$

On constate que l'encombrement des crochets est nettement moindre pour les aciers plats que pour les aciers ronds.

Études et essais

Les aciers plats et leurs applications ont fait l'objet de nombreuses études :

- travaux de fin d'études d'élèves-ingénieurs de Polytech-Clermont pendant 6 ans ;

- essais de comportement des aciers plats lisses, puis crantés : allongement, ductilité, limite élastique, pliages, ancrages dans le béton

sous forme linéaire, crochets ou vrilles ;

- essais comparatifs de tirant, de dalles, de poutres, de cadres fermés (dalots) en béton armé avec des aciers ronds et des aciers plats et examen de la fissuration (nombre et mesures des ouvertures) en fonction des charges appliquées ; essais pratiqués à l'entreprise Matière et à Polytech-Clermont ;

- étude par l'IFSTTAR, modélisation numérique de l'interface acier-béton : application au comportement des structures en béton, tirants et poutres dalles renforcés par des aciers plats crantés (thèse Song, nov. 2012).

Des résultats de ces essais et études, il en a résulté les enseignements suivants :

- le mode de laminage des aciers plats permet, à partir d'une même source d'approvisionnement d'acier brut, d'obtenir une limite élastique de 10 % à 20 % supérieure à celle obtenue pour des aciers ronds ;

- les éléments soumis à de la flexion (dalles, poutres) ont une ductilité nettement supérieure à ceux armés d'aciers ronds ;

- les fissures dues à la flexion sont moins importantes que celles correspondant aux éléments armés d'aciers ronds dans la gamme 0,2 mm-0,45 mm, largeurs de fissures qui sont susceptibles d'entraîner la corrosion ; même si les fissures apparaissent avant celles des aciers ronds, elles restent dans le domaine sécuritaire (on admet généralement qu'il n'y a pas de risque de corrosion à moins de 0,2 mm). ■

NORME XP A 35-026 ACIERS PLATS CRANTÉS SOUDABLES

La norme XP A 35-026 spécifie les prescriptions relatives aux barres et couronnes, en acier plat cranté soudable pour béton armé de nuances B500B, B550B, B600B, B550C et B600C de section nominale comprise entre 30 et 1 000 mm². Cet acier de section rectangulaire présente, à la surface, des faces de plus grande dimension, au minimum deux séries de reliefs.

Les valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques de traction des aciers plats et les dimensions et masses linéiques nominales sont précisées respectivement dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4 – Valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques de traction

Nuance d'acier	Limite apparente d'élasticité R_e (MPa)	Rapport $R_{e,act}/R_{e,nom}$ max.	Rapport R_m/R_e		Allongement total pour cent à la force maximale, A_{gt} %
			min.	max.	
B500B	500	1,30	1,08	–	5,0
B550B	550	1,30	1,08	–	5,0
B600B	600	1,30	1,08	–	5,0
B500C	500	1,25	1,15	1,35	7,5
B550C	550	1,25	1,15	1,35	7,5
B600C	600	1,25	1,15	1,35	7,5

Tableau 5 – Dimensions nominales préférentielles, sections et masses linéaires nominales

Dimensions nominales mm	Barres	Couronnes et produits déroulés	Section nominale mm ²	Diamètre équivalent mm	Masse linéaire nominale kg/m
12 x 2,5	X	X	30	6,2	0,236
17 x 3	X	X	51	8,1	0,400
20 x 4	X	X	80	10,1	0,628
22,5 x 5	X	X	112,5	12,0	0,833
30 x 5	X	X	150	13,8	1,18
35 x 6	X	X	210	16,4	1,65
40 x 7	X		280	18,9	2,20
50 x 10	X		500	25,2	3,93