

Extrait d'un document interne du Sétra rédigé en 2002 par Daniel Poineau et actualisé en 2010.

Voir également

- l'article de JP Gourmelon dans le n°20 du bulletin Ponts métalliques de 2000
"Matériaux pour ouvrages d'art métalliques"

- le guide du STRRES : FAME I - Réparation et rénovation des structures métalliques.

Les métaux pour construction métallique

1 GÉNÉRALITÉS

Les tableaux ci-dessous donnent les principales caractéristiques des différents métaux utilisés dans la construction des ponts métalliques depuis l'origine de ceux-ci jusque vers les années 1960-1970. Au-delà, les informations figurent dans la suite du présent texte. (Il est vivement recommandé de se reporter au bulletin de l'OTUA visé en référence qui détaille toutes les évolutions des métaux et des ossatures métalliques depuis le 18^{ème} siècle).

Évolution des métaux utilisés pour les ponts						
Les métaux	Limite élastique N/mm ²	Contrainte de rupture en N/mm ²	Allongement à rupture en %	Résistance à la corrosion	Soudabilité	Autres propriétés
Les fontes (fin 18 ^e à 1850)	$50 \leq \sigma_e \leq 100$	$100 \leq \sigma_r \leq 150$	$1 \leq A \leq 8$	Bonne	Non	Fragile
Le fer puddlé (1830 à début 20 ^e)	$170 \leq \sigma_e \leq 300$	$260 \leq \sigma_r \leq 400$	$5 \leq A \leq 25$	Médiocre risque de feuilletage	Possible après essais	Peut être fragile
Fer pur	$\sigma_e = 180$	$\sigma_r = 300$	30	Très bonne	Non	Très ductile
Aciers doux (à partir 1860)	$240 \leq \sigma_e \leq 280$	$420 \leq \sigma_r \leq 450$	$22 \leq A$	Peu sensible à la corrosion	Soudable après essais pour les ponts les plus anciens	Ductile (voir l'allongement)
Aciers mi-durs (à partir 1930)	$\sigma_e = 360$	$\sigma_r = 520$	$A \geq 20$	Assez peu sensibles à la corrosion	Les plus anciens ne sont pas soudables	Les plus anciens sont à la limite de la fragilité

2 LA FONTE

La fonte a été utilisée pour la construction des premiers ponts métalliques (pont de Coalbrookdale en 1779) sous forme de pièces moulées pour une sorte de substitution aux pierres de taille. Elle fut utilisée dans les ponts jusqu'au début du 19^{ème} siècle.

De nos jours, elle est encore utilisée (les tromplaques des ancrages de précontrainte...). Les caractéristiques mécaniques de ces fontes modernes sont bien entendu très différentes des fontes anciennes.

La fonte est un matériau fragile qui résiste mal à la traction, aux chocs (accident du pont de l'Ile-Saint-Denis près de Paris construit entre 1903 et 1904. Il fut heurté le 13 avril 1983 par un convoi fluvial de 3600t ce qui entraîna la rupture de 4 arches sur les 7 existantes) et aux dilatations thermiques. Il existe encore quelques structures ponts en fonte par exemple le Pont Sully, les piles en fonte du pont de Saint-andré de Cubzac en Gironde et celles du pont ferroviaire de Rozat sur la Sioule dans l'Allier.

3 LE FER PUDDLÉ

Le fer puddlé a précédé l'acier. Son procédé de fabrication date de la fin du 18^e siècle. Il était obtenu en faisant refondre la fonte issue des hauts-fourneaux dans des fours dits à réverbère. Puis, elle était brassée pour provoquer sa décarburation. Ensuite, à la fin de l'opération, le métal à l'état pâteux était soumis au marteau-pilon pour chasser les scories. Enfin, il passait au laminage pour obtenir des profilés, des barres et des tôles de petites dimensions (de 3 à 20 mm d'épaisseur pour des dimensions inférieures à 500x1000 mm (de telles tôles ont été utilisées pour la construction de ponts à partir du milieu du 19^e siècle et en 1850 pour celle du pont ferroviaire Britannia de 140 m de portée centrale au Royaume-Uni).

Le fer puddlé est à la base de nombreuses grandes constructions (le pont d'Arcole à Paris, la tour Eiffel, le viaduc de Garabit, l'ossature du magasin de la Samaritaine...). Il fut remplacé par l'acier aux débuts du XX^{ème} siècle. Les assemblages des ponts en fer puddlé faisaient appel essentiellement aux rivets car les boulons ont tendance à se desserrer sous les vibrations.

Le fer puddlé a souvent une structure hétérogène constituée d'une alternance de plans d'oxydes et de scories au milieu d'un fer presque pur. Il est difficilement soudable.¹ Souvent, il a un comportement fragile (rupture sans striction et faible allongement. Enfin, il est sensible à la corrosion feuilletante à cause des plans d'inclusion. Au contraire, parfois, il se rapproche d'un acier doux de type E24 se reporter aux deux tableaux qui suivent Le premier tableau est issu des règles de charges et de calcul du 29 août 1891. Le second tableau est issu du cahier des charges de 1913 et se retrouve dans les règles de charges et de calcul du 8 janvier 1915.

Avant de procéder au recalcul d'un pont en fer puddlé, il est indispensable de faire exécuter une expertise du matériau pour en connaître les qualités réelles qui peuvent varier dans de forte proportions.

Désignation (Règles de charges du 29 août 1891)		Allongement minimum de rupture en %	Résistance R _p minimum à la traction en kg/mm ²
Fer laminé	Profilés et plats dans le sens du laminage	8	32
	Tôles dans le sens du laminage	8	32
	Tôles dans le sens perpendiculaire au laminage	3,5	28
Acier laminé (fer puddlé)		22	42
Rivets en fer		16	36
Rivets en acier		28	38

Remarque : le fer pur a aussi été utilisé pour la construction de certains ponts.

4 LES ACIERS

Les premiers aciers ont été fabriqués à partir de 1856 grâce aux procédés inventés par Bessemer, Siemens-Martin et Thomas.

L'acier remplaça le fer puddlé et la fonte dans la fabrication des ponts. Parmi les premières constructions en acier, il faut signaler : le pont en arc de Saint-Louis et le pont de Brooklyn aux USA ainsi que le célèbre pont du Firth of Forth. En France, à noter le viaduc du Viar pont en arc de 220 m de portée construit à la limite des départements de l'Aveyron et du Tarn.

Plusieurs catégories d'aciers se sont succédé dans le temps. Leurs qualités ont fait de gros progrès même si leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas fait de bonds spectaculaires sauf vers la fin du 20^e siècle. Parmi les différents aciers, il faut noter :

- l'acier doux ;

¹Réparation et renforcement par soudure d'ouvrages en fer puddlé par J.P. Persy. Bulletin ponts métalliques n°10 de l'OTUA de 1984.

Réparation par soudage des ouvrages anciens : étude de la soudabilité des aciers par J. P. Persy. Bulletin ponts métalliques n° 14 de l'OTUA de 1990.

- les aciers mi-durs.

Même si la soudure voit le jour aux débuts du 20^e siècle, les assemblage des ossatures en acier ont été réalisées par des rivets jusque vers les années 1950 - 1960 même si, avant la deuxième guerre mondiale, certains ponts ont été assemblés par soudure (par exemple, les ponts de Neuilly et de Saint-Cloud en acier A 54 sur la Seine près du quartier de La Défense). Ensuite pendant une bonne vingtaine d'années, la soudure en atelier a cohabité avec les boulons à serrage contrôlé (boulons dits HR pour haute-résistance) pour les assemblages sur chantier (par exemple, les viaducs de la Porte-de-Bercy sur le boulevard périphérique de Paris). Finalement, la soudure sauf de rares exceptions est depuis la règle en atelier comme sur le chantier.

Nota : Chaque nuance d'un acier (par exemple le A 42 S comporte plusieurs qualités suivant l'usage auquel elle est destinée. Pour les ponts métalliques soudés, ce sont les qualités supérieures qui ont été utilisées (par exemple le A 42 S 4 appelé ensuite A 42 S 41 (cet acier de qualité S 4 ou S 41 était soudable et présentait une bonne résilience).



liaison ossature et dalle de couverture par connecteurs en fer plat à 45°

4.1 LES ACIERS DOUX

Ce sont les premiers aciers fabriqués et qui sont toujours utilisés de nos jours pour les charpentes faiblement sollicitées. Ils apparaissent pour la première fois dans les règles de charges de 1891 comme le montre le tableau ci-devant sous la forme d'un acier de limite élastique de l'ordre de 240 MPa. Cet acier deviendra plus tard l'acier A 42 puis le E 24 et de nos jours le S 235.

Vers les années 1920 apparaît l'acier A 48 qu'on retrouve ensuite sous le sigle E 28 et de nos jours sous sigle S 275.

Le tableau ci-après reproduit les données du cahier des charges du 29 octobre 1913 qui ne traite plus du fer laminé (le fer puddlé).

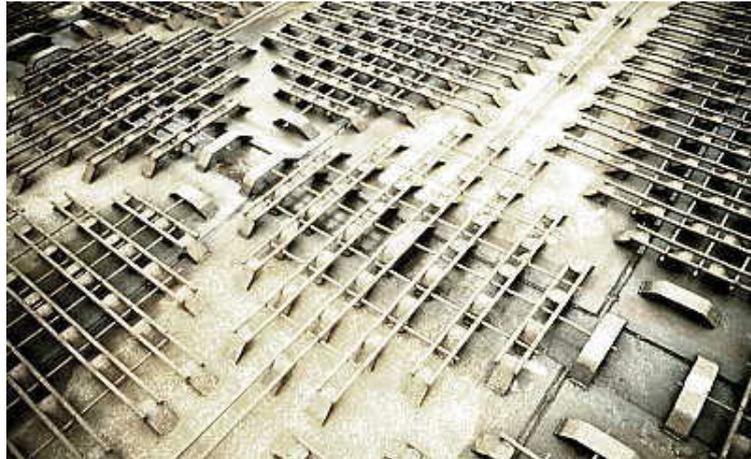
Matériaux (Cahier des charges du 29 octobre 1913)	Limite d'élasticité en kg/mm ²	Limite de rupture en kg/mm ²	Allongement à rupture en %
Acier moulé	22	45	15
Acier laminé (tôles unies, plats, barres rondes et carrées, profilés)	24	42	25
Rivets	20	38	28

4.2 LES ACIERS MI-DURS

Ils sont apparus vers les années 30 sous la forme des aciers A 52 et A 54 qui furent utilisés dans quelques constructions soudées. Ces aciers à teneur en carbone relativement élevée (0,25 à 0,30%) provoquèrent des accidents (effondrement d'un pont sur le canal Albert en Belgique et la fissuration de deux ponts en Allemagne avant la deuxième guerre mondiale. Il s'agissait de ruptures par temps froid).

Pendant la deuxième guerre mondiale, de nombreux bateaux soudés (principalement les Liberty Ships) se cassèrent littéralement en deux.

Des recherches furent entreprises pour expliquer les désordres et débouchèrent sur de nouvelles spécifications portant sur la limitation de la teneur en carbone (0,20 %), outre les limites sur les teneurs en soufre et phosphore. En sus, fut introduite une valeur minimale pour la résilience.



connecteur de dalle Robinson

Après la seconde guerre mondiale, la soudure recommença à se développer à partir des années 1950 sur des ossatures en acier Martin de nuance A 42 S acier posant beaucoup moins de problèmes que les aciers A 52 d'avant guerre.

Le cahier des Charges des Ponts et Chaussées juste avant sa modification en 1958 visait les aciers Ac 42 et Ac 54. Après 1958, le nouveau Cahier des Charges visait les aciers A 42 et A 52 pour la construction rivée et les aciers A 42 S (qualités 2, 3 et 4 qui devinrent ensuite 21, 31 et 41) et A 52 S (qualités a, b et g) pour la construction soudée.

Les dispositions réglementaires d'homologation des produits métalliques pour les ponts limitant l'épaisseur maximale des tôles à 50 mm, la largeur des membrures des poutres ne dépassait pas 600 à 700 mm et il y avait jusqu'à 5 tôles superposées ce qui compliquait de façon importante les jonctions soudées. Par voie de conséquence, il fallait aussi multiplier le nombre des poutres.

Les caractéristiques des organes d'assemblage des pièces métalliques que sont les rivets et les boulons HR (à serrage contrôlé) étaient à cette époque les suivantes :

- Rivets : A 37 R et A 42 R suivant la nuance de l'acier de charpente ;
- Boulons HR : des classes 8.8 et 10.9.



assemblages rivés au pont de Rangiport



assemblage par boulons à serrage contrôlé

Dans la période 1960-1970, apparaissent :

- les aciers dits à haute limite élastique (HLE) avec des épaisseur de tôles jusqu'à 150 mm (E 355, E 390, E 420 et E 460) ;
- les aciers à résistance améliorée vis-à-vis de la corrosion ou aciers patinables (aciers Corten et Indaten) ;
- des aciers à résistance améliorée vis-à-vis des risques d'arrachement lamellaire en cas d'effort de traction perpendiculaire à la tôle.

Les tôles de forte épaisseur ont permis de simplifier les coupes transversales des tabliers des ponts. Les ponts bipoutres ont remplacé les ponts à poutres multiples.

Les aciers à résistance améliorée vis-à-vis de la corrosion révélèrent progressivement des faiblesses (corrosion de la peau métallique de la tour du carrefour Playel à Saint-Denis construite en 1972 et qui dû être rénovée en 1987, corrosion des glissières de sécurité de l'autoroute A4, corrosion de la couverture de l'autoroute A 6 B qui a été démontée en janvier 2001...).

La circulaire de la Direction des Routes du 23 septembre 1985 en limita fortement l'usage. Ils ne peuvent être utilisés en atmosphère industrielle, en atmosphère marine et sur les itinéraires soumis au fondants pour le déneigement et le déverglaçage.

Dans les années 80 apparaissent :

- les premières tôles d'épaisseur variable avec une pente de l'ordre de 3 mm/m qui passera à 4 mm/m quelques années plus tard. Elles permettent à la fois de réduire le poids de charpente et le nombre des soudures. Elles existent en forme de coin, de chapeau chinois et de chapeau de gendarme. Elles furent utilisée pour la première fois au pont de Joigny-sur-Meuse ;
- les aciers thermomécaniques dont les améliorations des propriétés ont été obtenues par des opérations particulières en cours de laminage et de refroidissement et sans traitement thermique enfin de fabrication (trempe et revenu). Sont obtenus ainsi des aciers dont la résistance à la traction est plus élevée et le soudage plus facile ;²
- les aciers trempés-revenus dont les limites élastiques peuvent atteindre le double des aciers E460.



assemblage soudé des années 70 au pont de Guillaume le Conquérant à Rouen

² Le nouveau pont de Remoulins - Premier ouvrage en acier thermomécanique – Bulletin de l'OTUA n° 17 de 1994Revue travaux.



soudure de tôles de forte épaisseur des années 90 au pont de Nevers

5 LES CÂBLES

(se reporter aux documents visés en 1, 2, 5 et 6)

6 CARACTÉRISTIQUES DES MÉTAUX À PRENDRE LORS DU RECALCUL D'UN PONT MÉTALLIQUE

Il faut en premier lieu se reporter au dossier de l'ouvrage puis ensuite procéder à des investigations sur la structure avec prélèvement d'échantillons :

- mesure de la limite élastique, de la contrainte de rupture et de l'allongement à rupture ;
- mesure de la résilience ;
- analyse chimique de la composition ;
- mesure de la dureté sur les échantillons prélevés et sur le reste de l'ossature pour voir si tous les éléments sont de la même qualité ;
- contrôle de l'état de corrosion, présence de fissures de fatigue...

Nota : Comme pour tous les ponts construits ou reconstruits pendant la période 1940-1950, les investigations doivent être plus poussées à cause de l'utilisation, durant cette période de pénurie, d'aciers de toutes provenances.

Lors d'un recalcul, sous réserve de confirmer ce choix par les investigations visées ci-dessus, il est possible d'adopter les caractéristiques du tableau suivant.

Métaux	Limite élastique en MPa (N/mm ²)
Fer puddlé	200
Acier doux avant 1930	220
Acier doux après 1930	240
Acier mi-dur avant 1960	340
Acier mi-dur après 1960	360

Le tableau suivant donne les références des différents textes relatifs aux caractéristiques mécaniques des différents aciers de construction et des organes d'assemblage après les années 50. Pour les années antérieures, ces renseignements figurent dans le corps du présent texte ci-devant.

Aciers laminés pour constructions métalliques				
Numéro	Texte officiel et Date	Titre	Date annulation	Appellation des aciers - Observations
1	Circulaire n°3 3 du 8 avril 1958	Approbation du Cahier des Prescriptions Communes (CPC)		Aciers : Ac 42 Ac 52
2	Circulaire n°84 du 25 novembre 1962 – Fascicule spécial n° 63-1	Annulation des articles 30 et 30 bis du CPC de 1958	Le 4 octobre 1996	Aciers : A 42, A 52, A42 S 21/31/41,

Aciers laminés pour constructions métalliques				
Numéro	Texte officiel et Date	Titre	Date annulation	Appellation des aciers - Observations
	bis			A 52 S $\alpha/\beta/\gamma$
3	Décret n°65-768 du 7 septembre 1965 et circulaire n°66 du 4 octobre 1966 – Fascicule spécial n°66-19 ter	Titre III du Fascicule 4 du CPC	Le 24 juillet 1975	Aciers : A 42, A 52, A 42 S 3/3/4, A 52 S $\alpha/\beta/\gamma$
4	Circulaire 70-69 du 22 juillet 1970	Relative à la vérification du contrôle en usine		
5	Circulaire n°71-86 du 11 août 1971	Les modalités de vérification du contrôle en usine des aciers soudables .		
6	Décret 75-777 du 24 juillet 1975 et circulaire n° 75-128 du 28 août 1975 – BO 75-68 bis	Titre III du fascicule 4 du CPC	En cours de validité	Premier texte faisant références aux normes. Aciers de construction d'usage général : E 24 à E 36 des qualités 1 à 4. Aciers soudables à haute limite élastique : E 355 à E 460.

Rivets et Boulons à serrage contrôlé				
Numéro	Texte officiel et date	Titre	Date annulation	Observations
1	Avant 1958			Rivets pour les aciers A _C 42 et A _C 52
2	Circulaire n°3 du 8 avril 1958	Approbation du Cahier des Prescriptions Communes (CPC)	Annulation des articles 32, 33 et §3 et 7 de l'article 34 par la circulaire n°58 du 14 septembre 1967?	Rivets R.38 pour les aciers A42. Rivets R.42 pour les aciers A52. Utilisation des clauses de la SNCF pour les boulons à haute résistance (HR)
3	Circulaire n°58 du 14 septembre 1967	Titre IV du fascicule 4 : Rivets en acier – Boulons à haute résistance	Décret n° 83-251 du 29 mars 1983	Rivets A 37 R et A 42 R. Boulons à haute résistance HR 8.8 et HR 10.9
4	Décret n° 83-251 du 29 mars 1983	Titre IV du fascicule 4 : Rivets en acier et boulonnerie à serrage contrôlé	En cours de validité	Référence aux normes. Rivets : NF E 27.005 NF E 27.156. Boulons à serrage contrôlé : NF E 27.701, 702, 703 et 711.