

LES ESSENTIELS ACIER

CONCEVOIR ET CONSTRUIRE EN ACIER

Marc Landowski
Bertrand Lemoine

EYROLLES

ConstruirAcier est une association loi 1901 dont l'objectif est de promouvoir l'architecture et la construction métallique. Représentant l'ensemble de la filière acier, elle a vocation à faire connaître les atouts de l'utilisation des aciers dans les ouvrages de construction de bâtiments et de travaux publics.

Éditée par ConstruirAcier et destinée aux étudiants aussi bien qu'aux acteurs de la construction, la collection « Les essentiels acier » propose des ouvrages pratiques et didactiques rassemblant l'essentiel des connaissances sur l'utilisation de l'acier de ses performances.

À paraître dans la même collection

- *L'acier pour une construction responsable*
- *Sécurité incendie et construction acier*
- *Lexique de la construction métallique*

Conception graphique de la couverture : <http://www.sujet-objet.com>

ÉDITIONS CONSTRUIRACIER

20, rue Jean-Jaurès
92800 Puteaux
www.construiracier.fr

ÉDITIONS EYROLLES

61, bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

Les essentiels acier

Concevoir et
construire
en acier

Marc Landowski
Bertrand Lemoine

EYROLLES



Auteurs

Marc Landowski
Bertrand Lemoine

Direction éditoriale

Cedam / Bertrand Lemoine

Coordination éditoriale

Eve Jouannais

Conception graphique

Joseph Défossez

Première édition 2005

© ArcelorMittal, Luxembourg
Nous remercions pour leur
relecture attentive et leurs
corrections judicieuses :
agence Dubosc et Landowski,
Thierry Braine-Bonnaire,
Jean Dalsheimer, Gérard Delassus,
Jean-Louis Gauiliard, Patrick
Le Pense, Pierre Quaquin, Bruno
Théret, Loïc Thomas, Aurélien Trutt.

**Nouvelle édition 2012,
revue et actualisée**

Nous remercions pour leur
relecture attentive et leurs
corrections judicieuses :
Laure Delaporte, Stéphane Herbin,
David Izabel, Francis Keledjian,
Joël Kruppa, Suzanne Mathieu,
Joëlle Pontet.

N° d'éditeur : 8649
Dépôt légal : octobre 2011

Tous droits de reproduction,
de traduction et d'adaptation
réservés pour tous pays.

© Eyrolles / ConstruireAcier, 2012
ISBN : 978-2-212-13-348-6

Nous remercions également pour leur contribution :
Louis Fruitet, les éditions du Moniteur, les éditions
Parenthèses, les éditions Publimétal, les Presses
polytechniques et universitaires romandes,
les sociétés Arcelor Sections Commercial, Haironville,
PAB, Lafarge Plâtre, Profil du Futur, UGINE & ALZ.

(Avant-propos)

Concevoir et construire sont les phases essentielles et complémentaires de l'acte de bâtir assurées par les maîtres d'œuvre, architectes et ingénieurs, et les entreprises. Leurs savoir-faire, leurs compétences, leurs cultures doivent s'accorder pour produire une architecture de qualité, qui réponde au mieux aux pratiques et exigences des usagers et s'insère durablement dans un environnement donné.

Concevoir et construire se font avec des matériaux et chacun d'entre eux a ses spécificités tant sur le plan conceptuel que technique, mécanique et formel. Matériau de structure, mais aussi de plancher, de façade, de couverture, de cloisonnement, d'aménagement, l'acier peut être partout présent dans un édifice et ce à des degrés très divers, en gros œuvre comme en second œuvre, suivant le désir des concepteurs et des clients. Il représente un choix déterminant dès la conception, structurel notamment, qui exige rigueur et précision mais qui donne maîtrise du projet, liberté de création et choix de solutions adaptées.

Construire avec de l'acier relève de la filière composite. C'est un matériau dont la préparation et la mise en forme se fait en grande partie en atelier et dont les éléments arrivent sur le chantier prêts à être montés et associés à d'autres matériaux. La logique de la construction avec l'acier est une logique d'assemblage, où l'ossature se fait par points porteurs de type poteaux-poutres, sur lesquels viennent se greffer les éléments de planchers, d'enveloppe et de partitions. Là aussi, l'anticipation des choix techniques permet de tirer parti au mieux des possibilités architecturales du matériau.

L'acier relève d'un univers bien spécifique avec ses familles de produits, longs ou plats, ses profilés à froid, ses pièces moulées, forgées ou mécanosoudées, ses poutres, poutrelles et poteaux en forme de H, de I, de U, etc. Suivant le projet, la structure sera plane, spatiale ou encore suspendue, haubanée... Elle pourra être mixte, en acier-béton, ou tout acier, souvent associée à des façades en verre, des panneaux de bois, de béton, de plâtre... Elle peut être formée d'arcs, de poutres cintrées, de poutres en treillis, de poutres alvéolaires, de tubes et être associée à des planchers secs ou mixtes. Les portées peuvent être grandes, sans point d'appui intermédiaire, etc. L'acier se prête à toutes sortes de mises en œuvre et offre une gamme importante d'aspects. On peut même dire qu'il existe des aciers puisque ceux-ci se déclinent en de multiples nuances.

Dans cet ouvrage, dont cette seconde édition est revue et actualisée, sont abordés de manière synthétique et didactique tous les aspects importants de la construction en acier. Les qualités mécaniques de ce matériau, les possibilités techniques et formelles qu'il offre sont présentées et largement illustrées de dessins et de photographies, avec le souci constant de faire de ce manuel de la collection «Les essentiels acier» un outil d'aide à la conception à la fois simple et pratique, utile aux professionnels comme aux étudiants.

1 LE MATÉRIAU ACIER	6
La fabrication de l'acier	8
Les produits longs	10
Les produits plats	12
2 LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE L'ACIER	14
3 LA CONCEPTION GÉNÉRALE DE LA STRUCTURE	20
Les efforts appliqués à la structure	21
La stabilité de l'ouvrage	25
La descente de charges	30
La note de calcul	31
4 LES ÉLÉMENTS DE LA STRUCTURE	32
Les poutres en treillis et les fermes	36
Les cadres articulés et les portiques	38
Les arcs et les catènes	41
Les structures spatiales	42
Les structures tendues et haubanées	46
Les ossatures légères	50
Les assemblages	51
5 LES PLANCHERS	56
Les dalles béton	57
Les dalles sur bacs acier	58
Les dalles avec bacs collaborants	59
Les planchers secs	62
6 LES FAÇADES	64
Le contrôle des ambiances	65
La composition de la façade	67
Les types de façade	69
Les façade rideau et façade panneau	71
Les bardages	74
Les points singuliers	76

7 LES COUVERTURES

- Les toitures-terrasses à pente nulle
- Les toitures-terrasses plates ou rampantes
- Les toitures inclinées ou cintrées
- Les typologies de couverture

78

79

80

81

83

8 LES AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS ET LA SERRURERIE

- Les cloisonnements
- Les plafonds
- La serrurerie

86

87

89

90

9 LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION

- Les revêtements métalliques
- Les peintures
- Les aciers inoxydables
- Les aciers patinables

92

93

94

96

97

10 LA PROTECTION CONTRE L'INCENDIE

- Le comportement des structures
- La protection des structures

98

101

103

11 LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

ANNEXES

- Bibliographie
- Crédits iconographiques

108

111

111

112

1 LE MATÉRIAU ACIER

L'acier est un matériau issu de la réduction du minerai de fer ou du recyclage de ferrailles. Le fer est un élément très répandu dans l'écorce terrestre dont il représente 5 % mais on ne le trouve pas à l'état pur. Il est combiné avec d'autres éléments et mêlé à une gangue terreuse. La réduction de cet oxyde nécessite l'emploi d'un combustible : du charbon de bois jusqu'au XVIII^e siècle, puis du charbon de terre. Le métal ainsi obtenu est de la fonte qui contient 96 % de fer et 3 à 4 % de carbone et à partir de laquelle on produit de l'acier.

L'utilisation de l'acier dans la construction remonte à la fin du XIX^e siècle, bien que les métaux ferreux soient connus depuis environ quarante siècles. Auparavant on employait la fonte qui peut se mouler facilement mais se révèle cassante et impossible à forger. Il faut donc l'assembler à l'aide de boulons, de vis ou de clavettes. On est progressivement passé, à partir des années 1840, de l'usage de la fonte à celui du fer puddlé, la fonte étant affinée industriellement pour obtenir du fer pur, plus souple et plus facile à laminier, à percer et à forger. Le principe des rivets posés à chaud a permis de disposer d'un mode d'assemblage universel et facile à mettre en œuvre.

C'est une cinquantaine d'années plus tard que l'acier a pu être produit de façon industrielle et s'imposer ainsi à partir des années 1890 comme le matériau de la construction métallique, avec des caractéristiques physiques bien supérieures au fer grâce à la présence de traces bien dosées de carbone et d'autres éléments chimiques. L'assemblage s'est d'abord fait avec des rivets, puis, à partir des années 1930, par soudure ou boulonnage. La sidérurgie n'a cessé de perfectionner les qualités de ses aciers. La masse volumique de l'acier est de 7850 kg/m³. Un mètre cube d'acier pèse donc près de 8 t.

Les familles d'acier

On distingue les aciers dits aciers au carbone des aciers inoxydables. L'acier au carbone est aujourd'hui fabriqué par deux grandes filières d'importance à peu près égales : la filière fonte, où l'on réduit du minerai de fer dans un haut-fourneau avant passage au convertisseur pour transformer la fonte en acier, et la filière électrique, où l'on traite directement des ferrailles recyclées. Dans les deux cas l'acier est « mis à nuance » dans une station d'affinage. L'acier inoxydable est quant à lui produit uniquement à partir de la filière électrique.

Les aciers de construction contiennent en général de 0,1 à 1 % de carbone. Les additions sont variables : manganèse, silicium, molybdène, chrome, nickel, titane, tungstène... En fonction de ses composants lors de la « mise à nuance » et des traitements thermiques subis par les alliages lors de leur élaboration, l'acier aura des résistances mécaniques variables. Il existe plus de 3 000 nuances d'acier.

Exemples de types d'acier

- Acier inoxydable austénitique : acier allié avec 17 % minimum de chrome, 7 % minimum de nickel, plus éventuellement du molybdène, du titane, du niobium...
- Acier inoxydable ferritique : acier allié avec 17 % à 28 % de chrome, 0,1 % maximum de carbone, éventuellement du molybdène...
- Acier inoxydable martensitique : acier allié avec 12 à 17 % de chrome, 0,1 à 1 % de carbone, éventuellement du molybdène, du nickel, du soufre...
- Acier autopatinable (Corten, Indaten, Paten...) : acier faiblement allié avec un faible pourcentage de cuivre, de nickel et de chrome.

Les formes de produits

Pour obtenir leur forme de finition et leurs caractéristiques mécaniques les aciers courants dans la construction sont :

- laminés : ce sont les produits les plus couramment utilisés dans la construction métallique. Les demi-produits sont déformés successivement au travers des laminoirs constitués par des cylindres qui compriment et étirent la masse relativement malléable en raison de sa température encore élevée. L'étape ultérieure possible est le laminage à froid. Ce procédé est principalement utilisé pour façonner des tôles minces qui sont ensuite galvanisées et/ou pré-laquées ;
- étirés ou tréfilés : par étirage ou tréfilage (à chaud ou à froid) on amène un produit déjà laminé à une section plus réduite et à une plus grande longueur pour former des barres ou des fils.

On distingue dès lors :

- les produits longs (poutrelles, palplanches, câbles, fils, ronds à béton...), obtenus par laminage à chaud, étirage ou tréfilage ;
- les produits plats (tôles, bardages, profils minces, profils creux...) qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur.

Il existe aussi d'autres procédés moins courants de fabrication de pièces telles que le forgeage, le moulage...

La classification des produits

Étant donné la vaste gamme de produits en acier offerte aux concepteurs, la nécessité d'une réglementation des produits sidérurgiques apparaît évidente, concernant le produit (forme, dimensions, aspect et état de surface) mais aussi sa mise en œuvre. Aujourd'hui, l'essentiel de ces normes est harmonisé à l'échelle européenne.

La norme européenne comporte toujours les deux lettres EN (EuroNorme) précédées pour chaque pays par celles de son sigle national (par exemple : NF pour la France, DIN pour l'Allemagne, BS pour la Grande-Bretagne) ; viennent ensuite de un à cinq chiffres.

La norme indique les exigences techniques, les procédés d'élaboration, l'état de livraison, la composition chimique, les caractéristiques mécaniques et technologiques, l'état de surface.

Nous retiendrons deux types de normes :

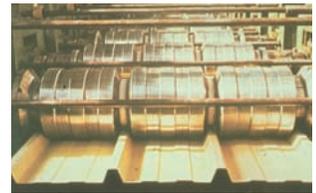
- les normes définissant les nuances d'acier ;
- les normes spécifiques aux produits accompagnées de leur tolérance.



Profilage de poutrelles.



Laminage à chaud d'une bobine d'acier.



Profilage à froid d'un bardage.

Exemples de normes françaises

- NF EN 10025 : régit la fabrication des produits laminés à chaud en acier de construction.
- NF EN 10088 : pour les aciers inoxydables d'usage général.
- NF EN 10034 : sur les tolérances dimensionnelles des poutrelles IPE.

La fabrication de l'acier



Haut-fourneau.

La filière fonte

Le minerai de fer et le coke (du carbone presque pur) sont disposés en couches en haut d'un haut-fourneau, qui peut atteindre 90 m de hauteur et 14 m de diamètre. Sa production varie entre 2 000 et 15 000 t de fonte par jour. Il fonctionne en continu, avec un arrêt en moyenne tous les quinze ans. De l'air à 1 200 °C est insufflé à la base du haut-fourneau. La chaleur dégagée par la combustion du coke fait fondre le fer et la gangue dans une masse liquide, où la gangue surnage.

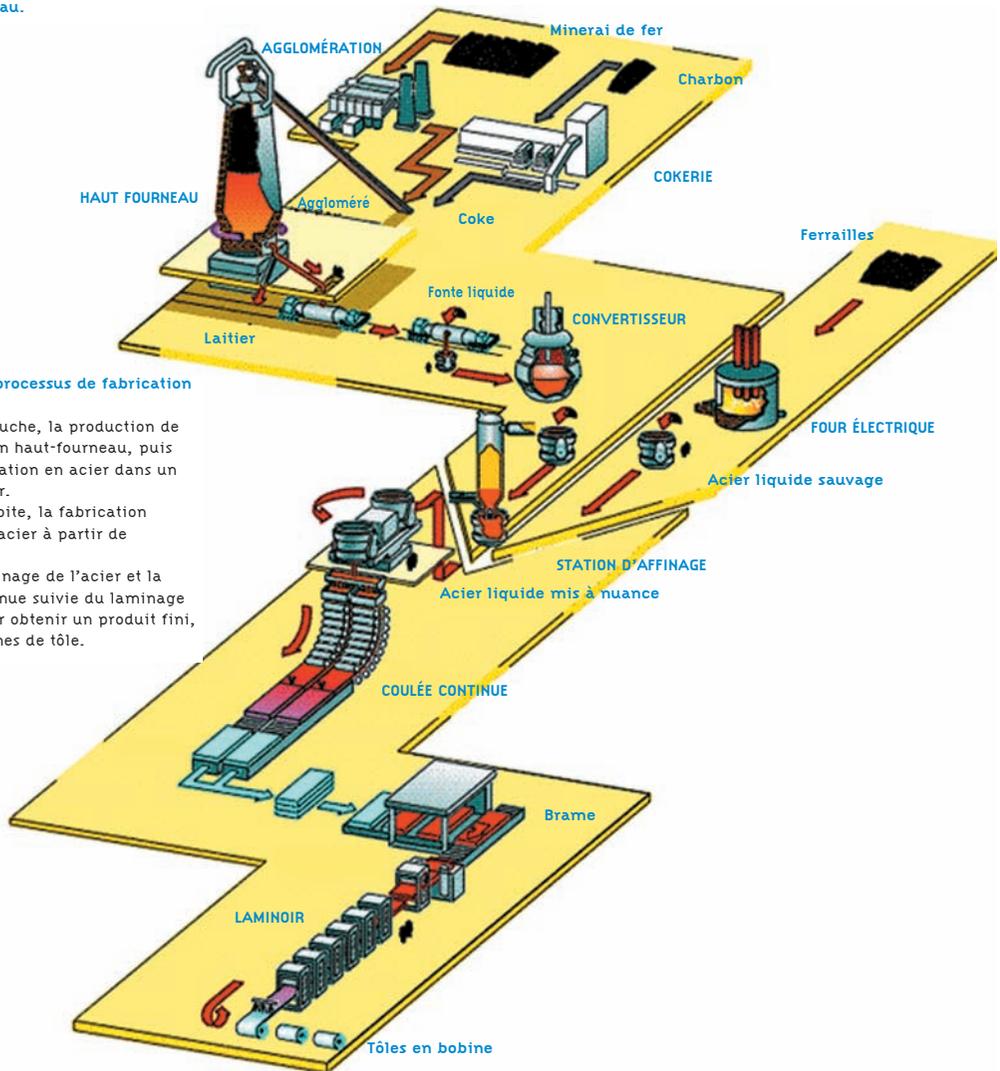


Schéma du processus de fabrication de l'acier.

En haut à gauche, la production de fonte dans un haut-fourneau, puis la transformation en acier dans un convertisseur.

En haut à droite, la fabrication directe de l'acier à partir de ferrailles.

En bas, l'affinage de l'acier et la coulée continue suivie du laminage à chaud pour obtenir un produit fini, ici des bobines de tôle.

On obtient de la fonte liquide. Celle-ci est alors conduite à l'aciérie dans des wagons pour être versée dans un convertisseur à oxygène.

La filière électrique

L'acier y est directement produit à partir de ferrailles de récupération, sélectionnées suivant leur composition ou leur nuance. Elles proviennent des emballages jetés, des bâtiments, des machines, des véhicules, des chutes de fonte et des aciers récupérés. Ces ferrailles sont chargées dans un four électrique. La fusion a lieu à 1 600° grâce à des arcs électriques. Le métal liquide est conduit ensuite à la station d'affinage de l'aciérie.

L'aciérie

La première étape de l'aciérie est le convertisseur à oxygène où l'on convertit la fonte en acier. On verse la fonte en fusion sur un lit de ferraille. Les éléments indésirables (carbone et résidus) contenus dans la fonte sont alors brûlés en insufflant de l'oxygène pur. On obtient de l'acier liquide dit « sauvage » – l'acier est encore imparfait à ce stade – qui est versé dans une poche. La production d'un convertisseur à oxygène est de 300 t par coulée. Une tonne de fonte permet d'obtenir 1,1 t d'acier (on a ajouté 0,1 t de ferraille).

L'étape suivante est la station d'affinage où les filières fonte et électrique citées précédemment se rejoignent. Les opérations d'affinage (ou de décarburation) et d'additions chimiques se font dans un récipient sous vide, l'acier étant mis en rotation. On insuffle de l'oxygène pour activer la décarburation et réchauffer le métal. La « mise à nuance » de l'acier, à savoir l'ajustement de sa composition chimique, est réalisée avec une grande précision grâce à ce procédé.



Four électrique d'Olaberria en Espagne.

La coulée continue

Vient ensuite l'étape de la coulée continue qui permet le moulage d'ébauches (ou demi-produits). On coule l'acier en fusion en continu dans un moule sans fond. Le métal au contact des parois refroidies à l'eau commence à se solidifier. Il descend du moule, guidé par un jeu de rouleaux, et continue de se refroidir. Arrivé à la sortie, il est solidifié à cœur. Il est immédiatement coupé aux longueurs voulues.

Les demi-produits obtenus sont :

- les brames, de 20 à 30 cm d'épaisseur, 2 m de largeur et de 5 à 6 m de longueur permettent la production des produits plats laminés à chaud (plaques, feuilles, bobines...);
- les blooms, de 15 cm à 100 cm de côté, pouvant aller jusqu'à 12 m de longueur, et les billettes, de 15 cm de côté, qui donneront les produits longs laminés à chaud (fil, barres, rails, profilés divers, poutrelles...).