Les essentiels acier

Concevoir et **construire** en acier

Marc Landowski
Bertrand Lemoine

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

EYROLLES

{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

Sommaire

7 LES COUVERTURES 78
- Les toitures-terrasses à pente nulle 79
- Les toitures-terrasses plates ou rampantes 80
- Les toitures inclinées ou cintrées 81
- Les typologies de couverture 83

8 LES AMÉNAGEMENTS INTÉRIEURS ET LA SERRURERIE 86
- Les cloisonnements 87
- Les plafonds 89
- La serrurerie 90

9 LA PROTECTION CONTRE LA CORROSION 92
- Les revêtements métalliques 93
- Les peintures 94
- Les aciers inoxydables 96
- Les aciers patinables 97

10 LA PROTECTION CONTRE L'INCENDIE 98
- Le comportement des structures 101
- La protection des structures 103

11 LE DÉVELOPPEMENT DURABLE 108

ANNEXES 111
- Bibliographie 111
- Crédits iconographiques 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 laminer, 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/m^{3}. 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

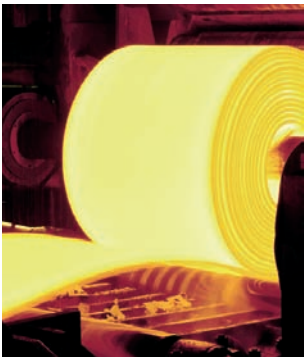
Pour obtenir leur forme de finition et leurs caractéristiques mécaniques les aciers courants dans la construction sont :
– laminés : ce sont les produits les plus couramment utilisés dans la construction métallique. Les demi-produits sont déformés successivement au travers des laminoirs constitués par 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.

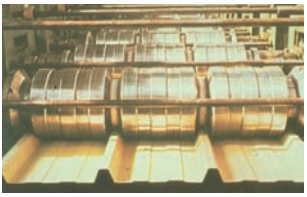
Il existe aussi d'autres procédés moins courants de fabrication de pièces telles que le forgeage, le moulage...



Profilage de poutrelles.



Laminage à chaud d'une bobine d'acier.



Profilage à froid d'un bardage.

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.

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.

11 LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les 14 cibles HQE®

1. Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat
2. Choix intégré des procédés et produits de construction
3. Chantiers à faibles nuisances
4. Gestion de l'énergie
5. Gestion de l'eau
6. Gestion des déchets d'activité
7. Gestion de l'entretien et de la maintenance
8. Confort hygrothermique
9. Confort acoustique
10. Confort visuel
11. Confort olfactif
12. Qualité sanitaire des espaces
13. Qualité sanitaire de l'air
14. Qualité sanitaire de l'eau.

Acier compacté, en attente de recyclage.



La norme NF P 01-010 (décembre 2004) précise la nature et la qualité des informations qui constituent les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction, établies à l'aide de " bases communes de l'information objective, quantitative et qualitative ".
Reposant sur les méthodes d'inventaire et d'analyse de cycle de vie décrites dans les normes ISO 14040 et ISO 14044, les informations recueillies relèvent d'une unité fonctionnelle précise et les caractéristiques obtenues sont présentées dans une fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES), dont une partie est consultable sur la base de données publique INIES. Une FDES peut concerner une gamme de produits similaires ou un produit spécifique identifié par une dénomination commerciale.

La population mondiale croît sans cesse, consomme plus de biens, de services et d'énergie, produit de plus en plus de déchets. Les activités humaines doivent ainsi veiller à minimiser l'emploi des ressources disponibles, à économiser les énergies et à réduire les pollutions. Nous devons nous soucier de recycler les matériaux existants, de penser et agir en terme de développement durable.

L'association HQE® a mis au point une démarche formalisée autour de quatorze cibles relatives au développement durable. Cette démarche opérationnelle vise à maîtriser les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur et à créer un environnement intérieur sain et confortable. Elle est applicable aussi bien à la construction neuve qu'à la réhabilitation. La prise en compte de ces cibles aux différentes étapes de conception et de réalisation permet une gestion globale du coût. L'acier comme matériau de construction permet de s'inscrire dans cette démarche et de répondre à l'ensemble des préoccupations du développement durable, dont les impacts environnementaux.

Le choix des matériaux

Tous les produits manufacturés ont leur propre cycle de vie dont l'analyse, ou ACV, est l'instrument de mesure de leurs impacts sur l'environnement. Les différentes phases du cycle de vie d'un élément constructif comprennent l'extraction et la transformation des matières premières, son transport, sa mise en œuvre, sa vie en œuvre, jusqu'à sa fin de vie (démolition ou déconstruction, recyclage et traitement des déchets).

De la maîtrise d'ouvrage aux utilisateurs en passant par la maîtrise d'œuvre, il est ainsi possible de prendre en compte l'ensemble de ces caractéristiques, élément par élément, pour analyser les impacts de l'ouvrage global. L'adaptation nécessaire fait souvent l'objet d'une étude qui doit être conduite avec les outils d'exploitation des fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) définies par la norme NF P 01-020 ou par des logiciels adaptés. Au niveau européen, la FDES s'appelle European Product Declaration (EPD) et une norme harmonisée correspondant à la NF P 01-010 est en préparation pour que ces supports contiennent des informations homogènes dans les prochaines années.

Dans le cadre d'une démarche environnementale, le choix d'éléments tout ou partie en acier présente de nombreux avantages liés à son mode de production. L'acier est produit soit à partir de minerai de fer et de coke (filière fonte) – le minerai de fer, de même que le charbon, est très abondant sur terre –, soit à partir de ferraille et d'électricité (filière électrique). Aujourd'hui, la production de l'acier destiné à la construction est réalisée à partir de ferrailles recyclées dans une proportion variant de 45% à plus de 85% en fonction du type de produits. Cette part d'acier produit à partir d'acier recyclé ne fait que croître.

Ainsi, l'acier actuellement immobilisé dans des bâtiments ou des objets sera demain un gisement de matière première.
Le procédé de fabrication de l'acier génère relativement peu de déchets ou de substances polluantes pour l'environnement et l'eau qu'il consomme est pour une large part recyclée. Les co-produits de la production de l'acier sont réutilisés, notamment le laitier de haut fourneau comme ballast dans la construction routière ou pour la fabrication du ciment. Les gaz émis sont recyclés ou filtrés. Depuis 30 ans les efforts des sidérurgistes ont permis de réduire la quantité d'énergie nécessaire à la production d'acier de 50%. A l'étape de production, la quantité de CO_2 émise atteint aujourd'hui des niveaux de l'ordre de 1,25 t par tonne produite (source Wordsteel). L'augmentation du recyclage permettra de faire encore diminuer ces valeurs.



Centre de tri de ferrailles. La séparation des ferrailles avec les autres matières se fait aisément par électro-aimant.

En outre, l'acier se marie facilement avec les autres matériaux. Cela facilite leur choix en fonction de critères environnementaux tout en laissant une grande liberté de conception. Il est par exemple possible d'associer à une ossature métallique des vêtures en bois non tropical ou des façades en verre.

La construction

La mise en œuvre de l'acier permet de minimiser les nuisances lors de la construction. Les éléments en acier sont relativement légers et donc faciles à transporter. En structure, cela représente une économie de matière et permet des fondations réduites qui n'exigent ni fouilles et ni excavations génératrices de déblais et de rotations de camions. Cela limite également l'utilisation sur le chantier de machines telles que les toupies à béton qui occasionnent circulation et salissures.



Passerelle fabriquée en atelier, en route pour être placée d'une seule pièce, garde-corps et platelage compris, au-dessus de la Leysse, France. Patriarche & Co architectes.

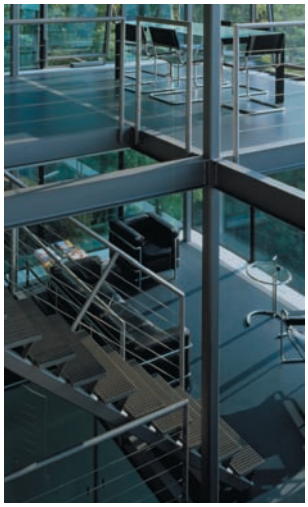
Les structures ou vêtures en acier sont en grande partie fabriquées en atelier ou en usine, dans un environnement contrôlé où les conditions de travail et de sécurité sont meilleures. La tendance est d'ailleurs à augmenter cette part de la fabrication hors site, pour ne réserver au montage proprement dit que l'assemblage d'éléments préfabriqués. La limite est ici fixée par le gabarit de transport (routier ou fluvial) et par la capacité des moyens de levage. En outre, les structures en acier peuvent être livrées juste à temps pour le montage en « flux tendu », limitant ainsi les besoins de stockage sur le chantier ce qui est particulièrement précieux en site urbain.



Hall de contrôle de véhicule à Savigny-le-Temple, France, dont la structure est composée de PRS et de profilés du commerce adaptés au montage *in situ*. H. Fricout-Cassignol architecte.

Une construction en acier signifie la mise en œuvre à sec, en partie ou en totalité, de produits finis, sans bruit ni poussière qui polluent et perturbent le voisinage. L'acier n'induisant aucun déchet, les contraintes d'évacuation sont supprimées et la rapidité de montage minimise la durée du chantier.

La « vie en œuvre » du bâtiment



Maison à Stuttgart, Allemagne. Autosuffisante sur le plan énergétique, elle est conçue pour être facilement déconstruite et recyclée en fin de vie. Werner Sobek architecte.

Dans le cycle de vie d'un bâtiment, on distingue, d'une part, l'énergie grise qui comporte toute l'énergie nécessaire pour l'extraction, la fabrication et le transport des produits ainsi que la construction et, d'autre part, l'énergie opérationnelle d'un bâtiment pendant sa durée de vie qui comprend l'éclairage, le chauffage, la ventilation, le fonctionnement, l'entretien, les réparations. Pour un immeuble de bureaux standard, l'énergie consommée pendant la durée de vie du bâtiment peut être jusqu'à dix fois supérieure à l'énergie grise. Il est donc essentiel de faire davantage porter l'effort d'économie sur l'énergie consommée que sur l'énergie grise. Par exemple, en privilégiant une bonne conception énergétique du bâtiment, l'isolation thermique (du froid comme de la chaleur), l'éclairage et la ventilation naturelle, la facilité de maintenance et la capacité d'évolution dans le temps.

L'acier en structure facilite les vastes ouvertures qui laissent pénétrer la lumière et permettent éventuellement de profiter de l'énergie solaire. Très favorables au bilan énergétique, des solutions d'isolation par l'extérieur sont aisément applicables. Avec des charpentes en acier en poteaux-poutres, les maîtres d'ouvrage et les architectes ont un maximum de liberté dans la conception de nouvelles organisations intérieures, voire dans la transformation des façades. Les édifices existants peuvent être facilement transformés ou même changer d'affectation.

Enfin, l'acier est durable et on sait le protéger de la corrosion. Bien entretenu, il dure longtemps à l'image de bâtiments plus que centenaires comme la Tour Eiffel. En allongeant la vie utile d'une structure, l'énergie grise dans celle-ci se répartira sur une période encore plus longue et dès lors on optimisera le rendement de l'énergie dans la construction. Pour rendre possible l'allongement de la vie d'un bâtiment, le projet constructif doit être souple et adaptable. L'acier est un matériau qui convient parfaitement à cette adaptabilité. Ses propriétés naturelles (ductilité, rapport résistance/poids, dureté), lui confèrent aussi une résistance élevée à des contraintes inattendues comme les catastrophes naturelles telles que les séismes.

La fin de vie

Démontage du pont de Hammer à Düsseldorf, Allemagne.



La durée de vie « utile » de tout bâtiment et de toute structure n'est pas illimitée. Les bâtiments qui ne peuvent pas être rénovés doivent pouvoir être démontés ou « déconstruits » plutôt que simplement démolis, à défaut d'être transformés. Ce démontage peut se prévoir dès la conception. L'objectif doit être de pouvoir séparer facilement les composants et d'en trier les matériaux, soit pour les réutiliser soit pour les recycler. Or l'acier se prête bien à un démontage en vue de la réutilisation des éléments. En outre, il se trie aisément grâce à ses propriétés magnétiques et peut être recyclé à 100 % et à l'infini sans rien perdre de ses qualités.