

CHAPITRE N°01 :

L'ACIER DE CONSTRUCTION

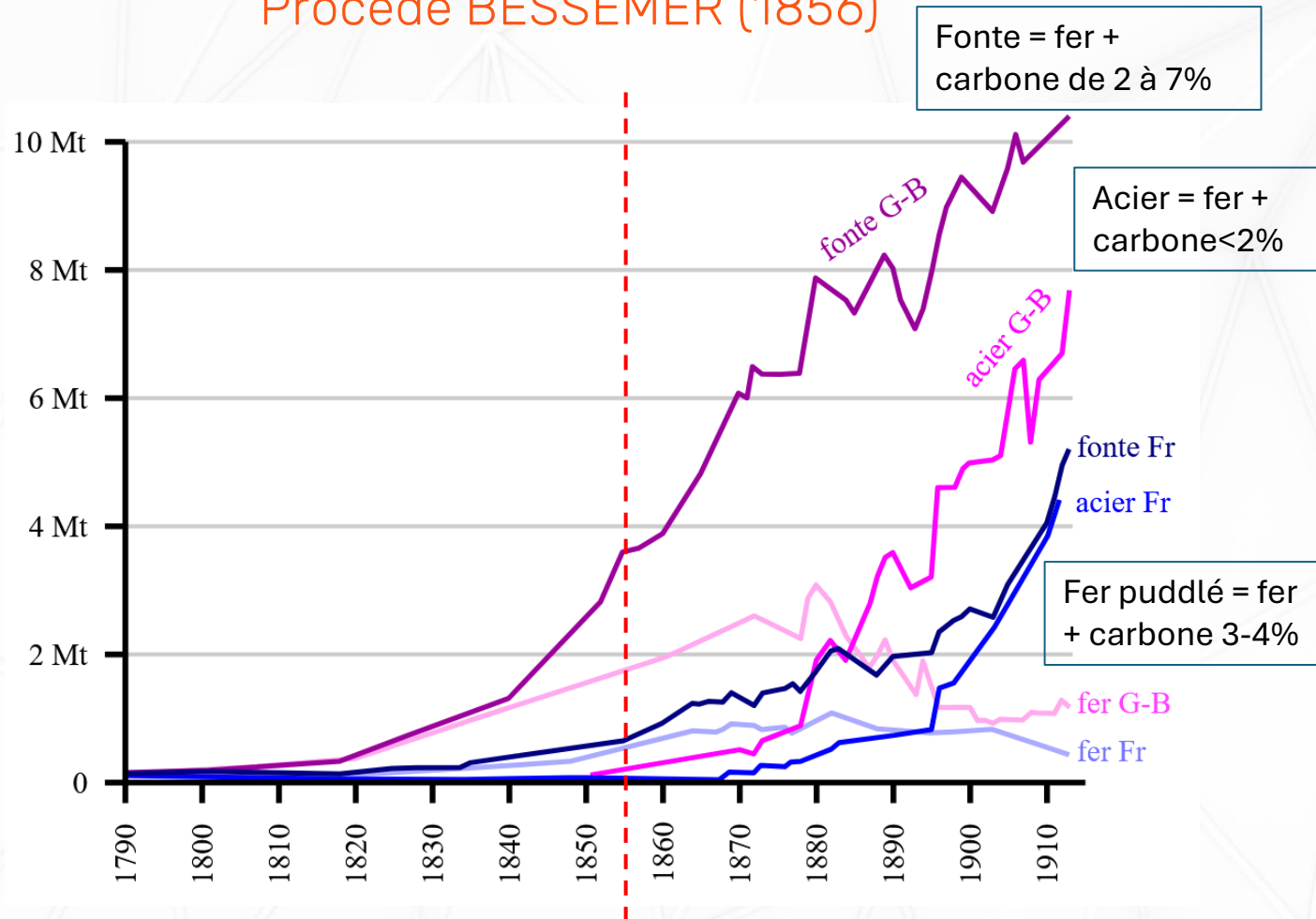
- Enseignant : Cédric LOINTHIER – Promotion 2015
- Contact : cedric.lointhier@ingemetal.fr

- ❑ Objectifs d'apprentissage
- ❑ Historique
- ❑ Domaines d'utilisations
- ❑ Avantages et inconvénients des constructions en acier
- ❑ Fabrication de l'acier
- ❑ Définition de l'acier
- ❑ Comportement mécanique de l'acier
- ❑ Classification des produits sidérurgiques
- ❑ Règles et normes

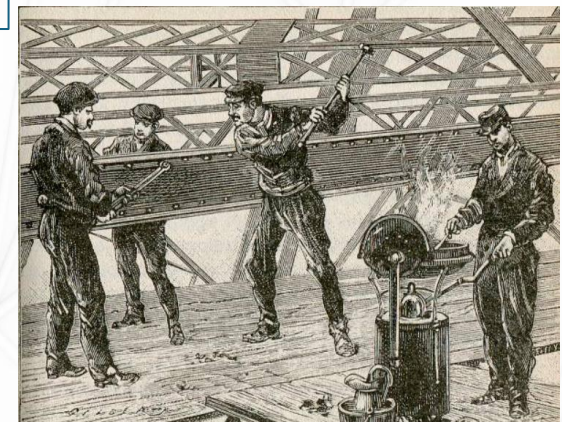
Être capable de :

- ☐ Définir le matériau Acier
- ☐ Connaitre les caractéristiques mécaniques de l'acier
- ☐ Connaitre les produits issus de la transformation de l'acier
- ☐ Connaitre les normes et règlements autour de la construction métallique

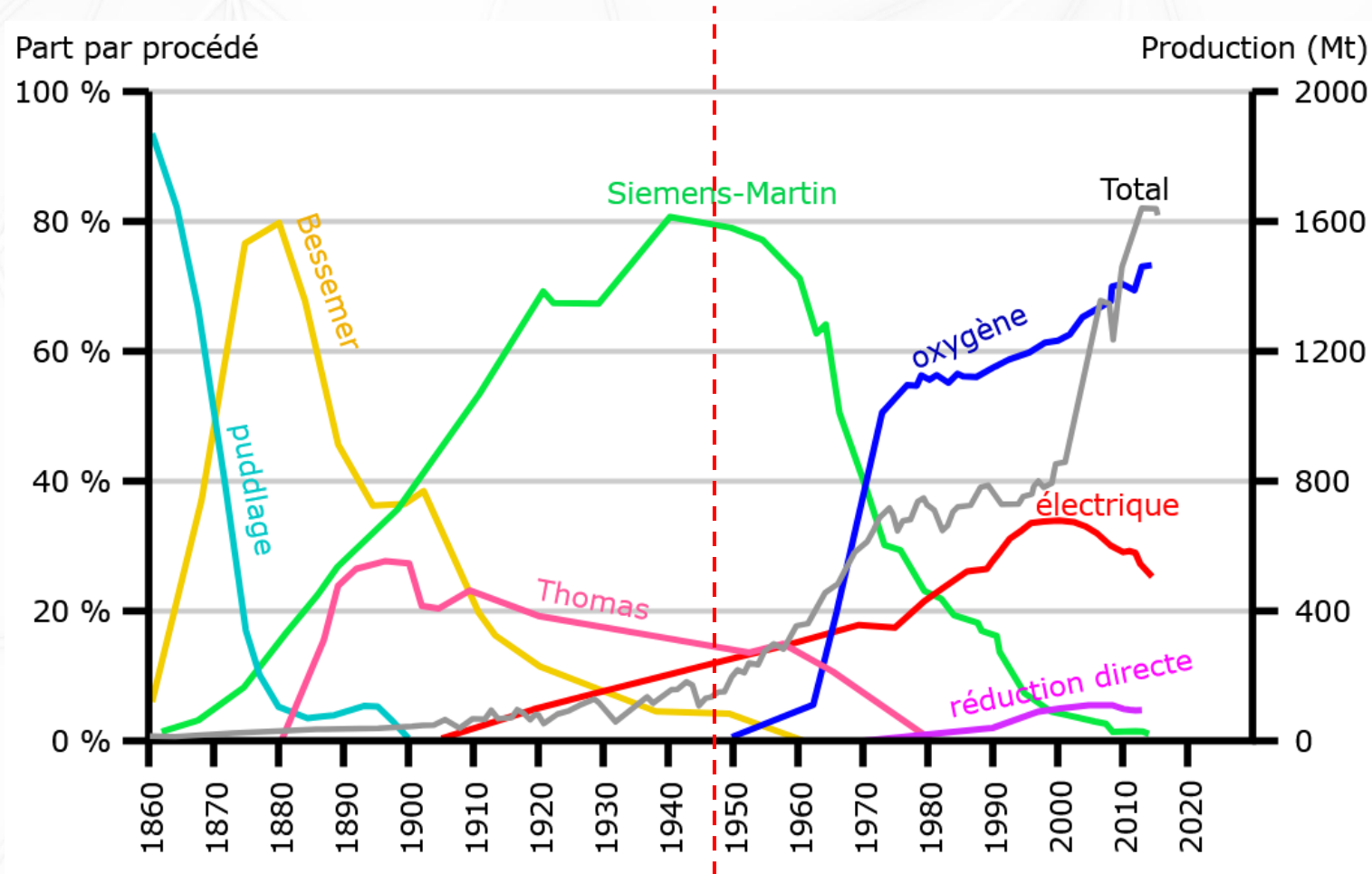
Procédé BESSEMER (1856)



Courbe d'évolution du fer au XIXème siècle



Depuis 1947 : Application des normes relatives aux produits sidérurgiques d'usage courant en acier au carbone



Courbe d'évolution des procédés de fabrication de l'acier

- ❑ Bâtiments industriels : bâtiments de grandes hauteurs et portées (avec ou sans ponts roulants)
- ❑ Couvertures des bâtiments de grandes portées : constructions sportives, marchés, hangars, ateliers d'aviation, grandes surfaces ...

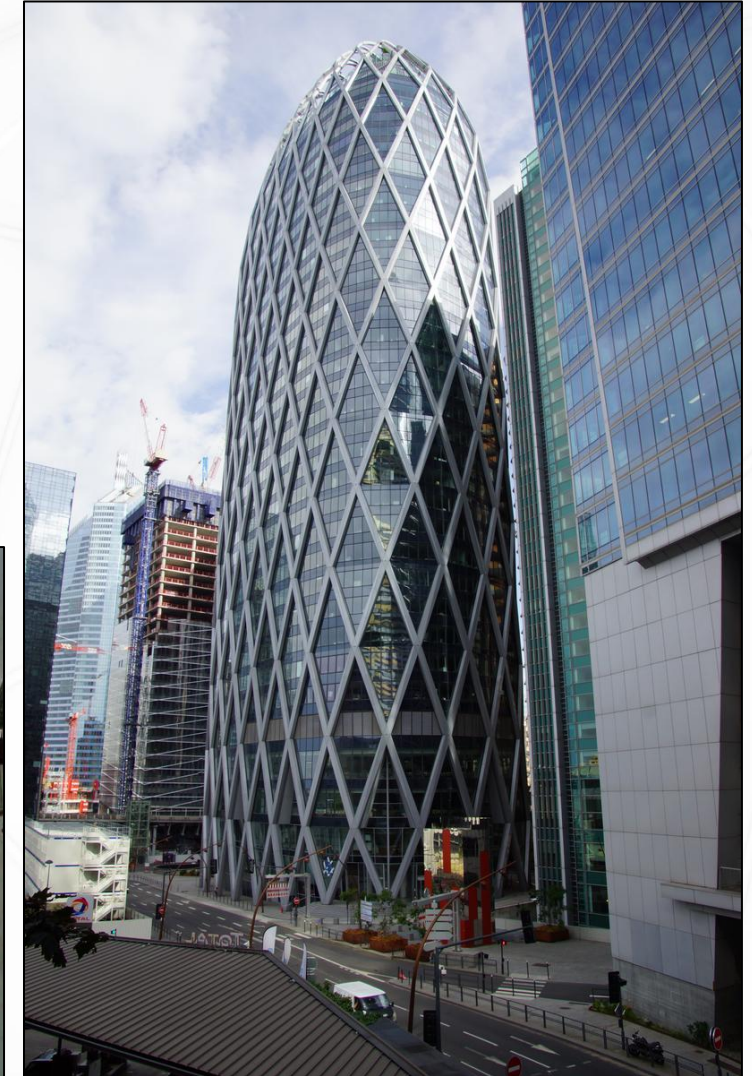


*Forum des Halles
(PARIS)*

❑ Usine d'assemblage de l'A380



❑ Ossatures des bâtiments à plusieurs étages



*Tour D2
LA DEFENSE
(PARIS)*



❑ Ponts & Passerelles : à poutre, en arc, suspendu, à haubans ...



❑ Tours & Mats : pylônes des lignes électriques, de télécommunication ...



❑ Mécanismes mobiles : les grues ...



❑ Autres structures ...



- ❑ **Industrialisation totale** : Il est possible de préfabriquer intégralement des bâtiments en atelier, avec une grande précision et une grande rapidité (notamment à partir des laminés). Le montage sur site, par boulonnage, est d'une grande simplicité
- ❑ **Légèreté**
- ❑ **Résistance mécanique** :
 - Grande résistance de l'acier à la traction permet de franchir de grandes portées
 - Possibilité d'adaptation plastique offre une grande sécurité
 - Bonne tenue aux séismes, du fait de la ductilité de l'acier
- ❑ **Modifications ultérieures** aisément réalisables (transformations, adaptations, surélévations, renforcements)
- ❑ **Grandes possibilités architecturales**

- ❑ La corrosion : l'acier tend à s'oxyder et à se corroder lorsqu'il est soumis à des atmosphères humides, à des agressions chimiques, à la condensation, qu'il est en contact avec l'eau ou les sols.

Solut° : Peinture, galvanisation, métallisation + gamme d'aciers inoxydables

- ❑ Mauvaise tenue au feu : le module d'élasticité de l'acier commence à diminuer à partir de la température $T=200^{\circ}\text{C}$. L'acier perd sa capacité portante et passe à l'état plastique à partir de la température $T=600^{\circ}\text{C}$.

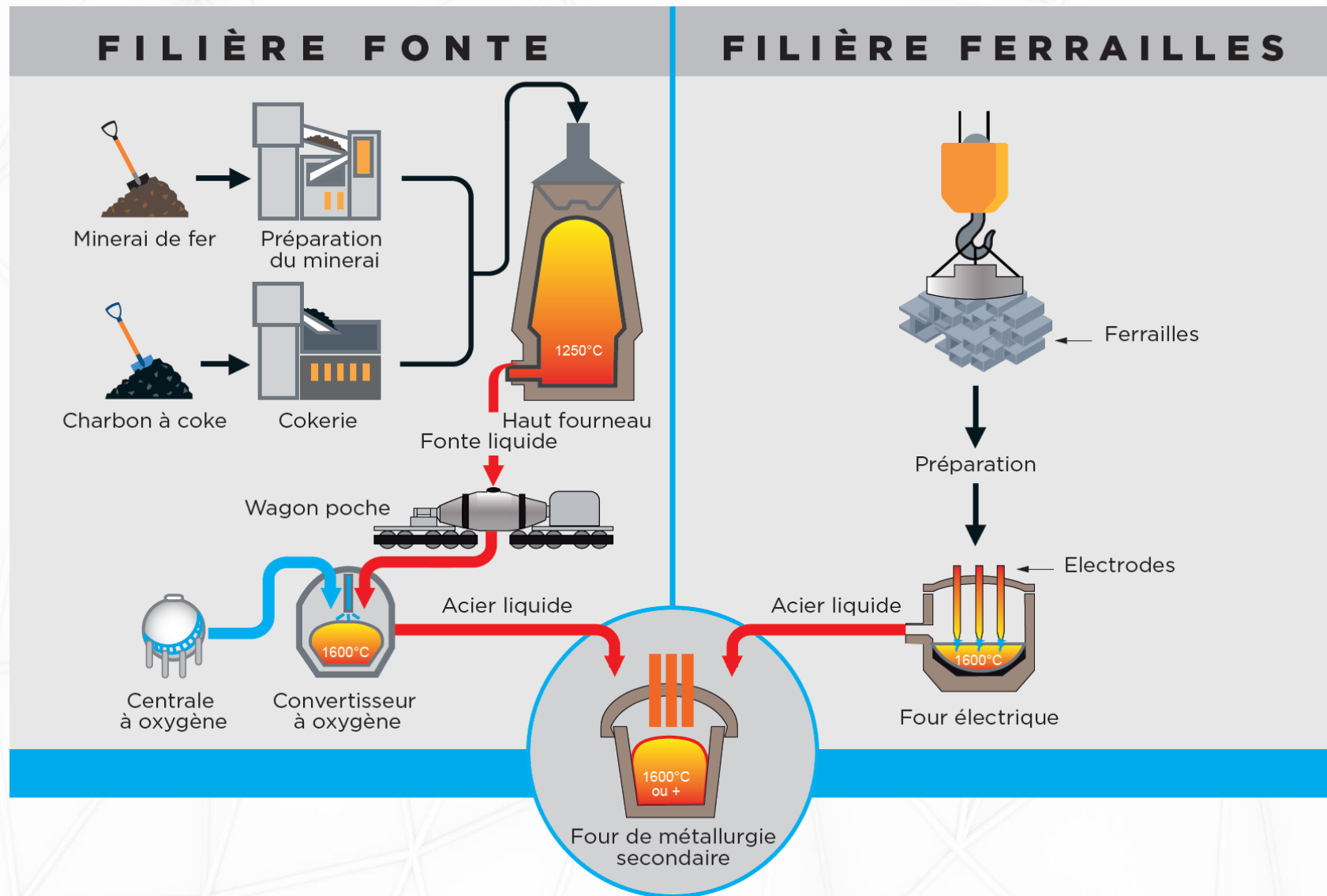
Solut° : Peinture intumescente, flocage, protection par doublage, mixité avec le béton

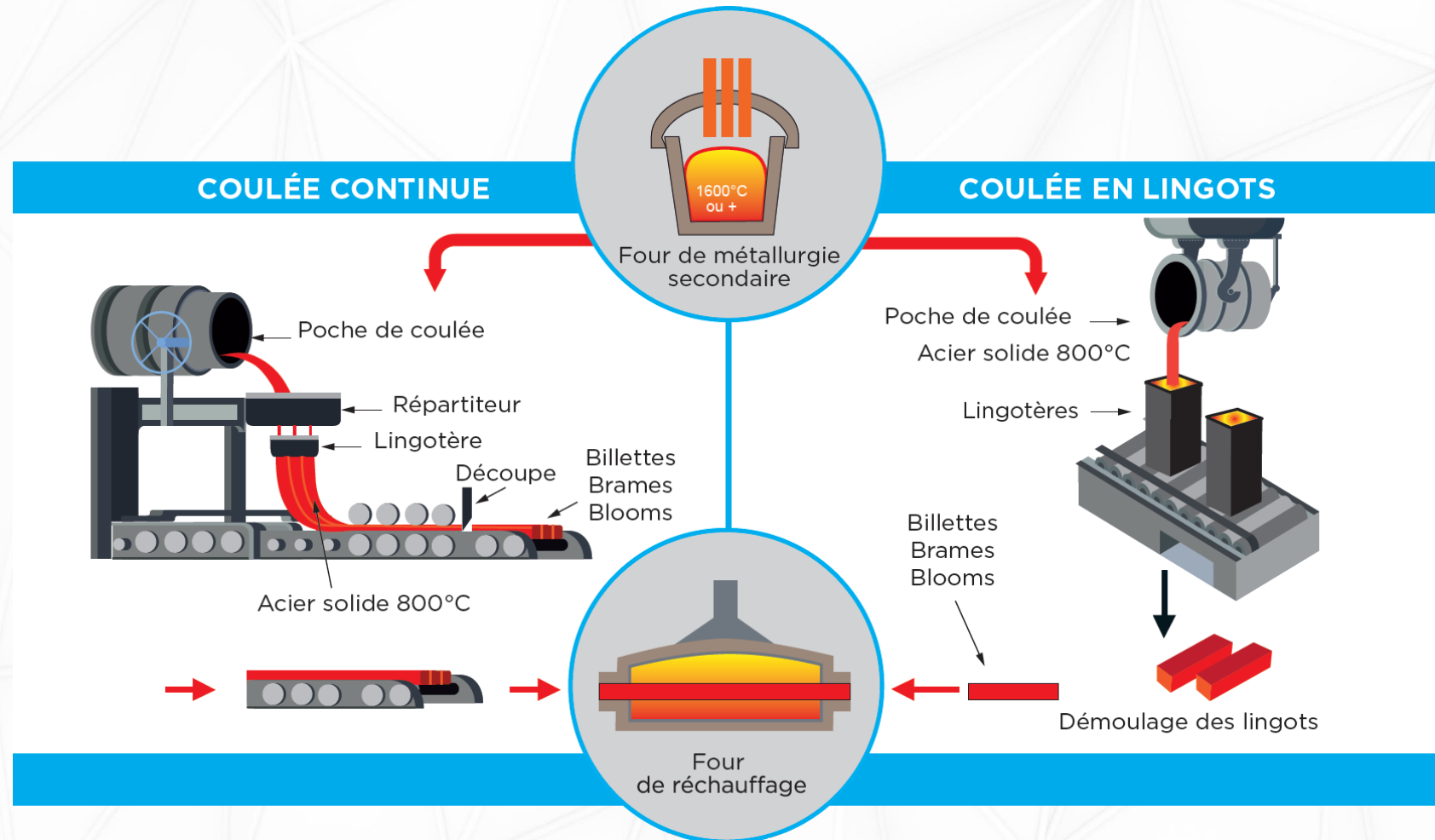
- ❑ Résistance à la compression moindre que le béton

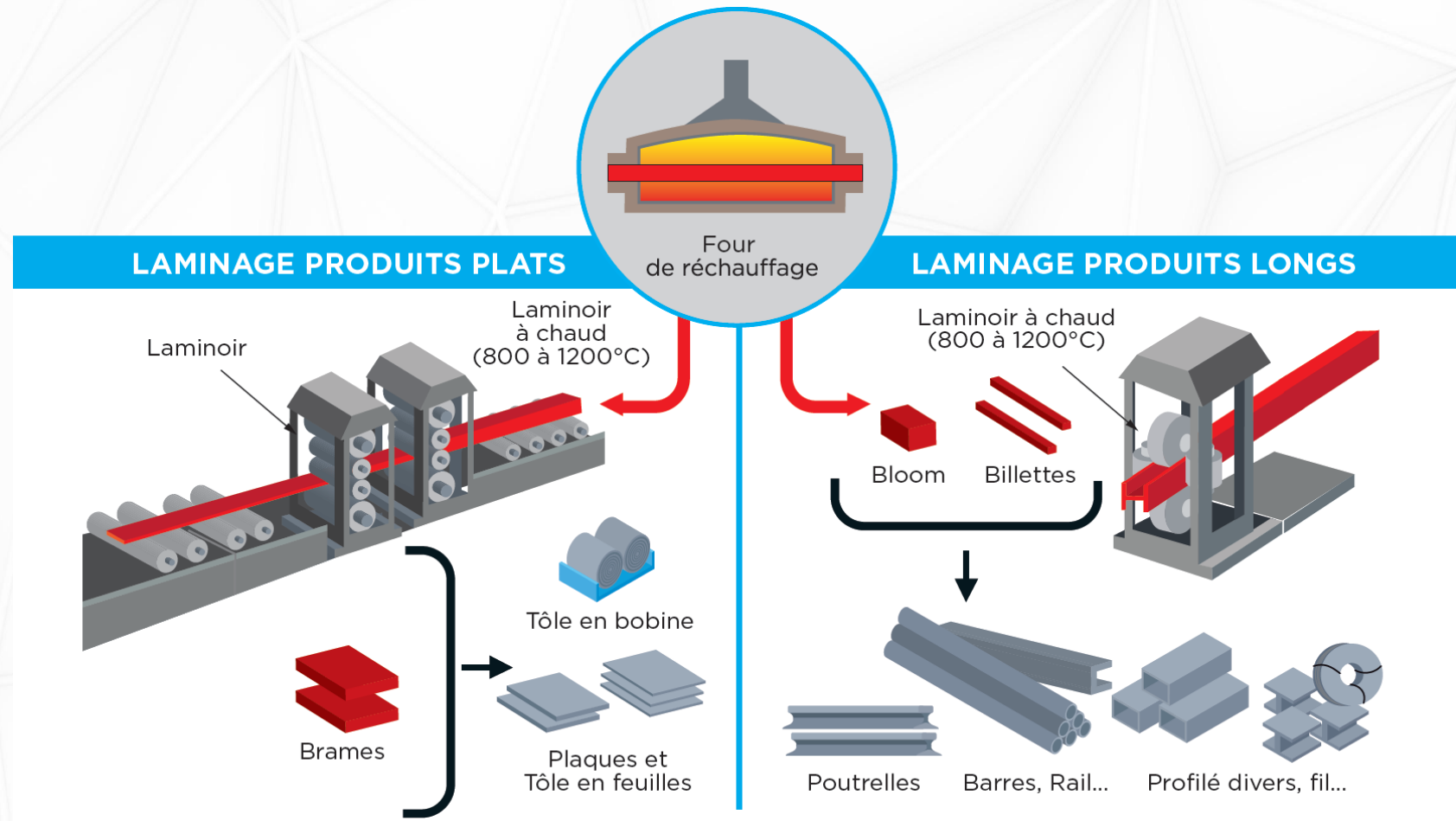
Solut° : Choix profil ou PRS plus résistant en compression, mixité avec le béton

- ❑ Susceptibilité aux phénomènes d'instabilités en raison de l'élancement des profils métalliques

Solut° : Ajout de maintiens au flambement, déversement et voilement







- ❑ L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un peu de carbone, qui sont extraits de matières premières naturelles tirées du sous-sol. Le carbone n'intervient, dans la composition, que pour une très faible part (variant entre 0,02% et 2% environ).
- ❑ Le fer pur est un métal **malléable** et **ductile**, ce qui signifie qu'il possède une grande capacité à se déformer dans le domaine plastique avant d'atteindre la rupture.
- ❑ L'ajout de carbone permet d'augmenter la résistance de l'alliage, mais en diminue la ductilité et la soudabilité. La majorité des ossatures métalliques actuelles comportent des parties soudées, et le besoin de sécurité implique de conserver une ductilité acceptable. Les aciers utilisés couramment dans le domaine de la construction ne comprennent donc qu'une proportion modeste de carbone.

❑ Les aciers de constructions se définissent essentiellement par leurs propriétés d'usages.

❑ L'Eurocode 3 les précisent :

- **Résistance** (limite d'élasticité f_y et résistance à la traction f_u).
- **Ductilité** – Capacité de se déformer sans rupture (rapport limite d'élasticité/rupture et allongement).
- **Ténacité** – Résistance à la rupture fragile (rupture sans déformation) : Résilience.
- Et si nécessaire ductilité dans le sens de l'épaisseur (arrachement lamellaire) striction « travers court ».

❑ Désignation d'un acier de construction :



- Exemples:

Exemple 1 :

S 235

Exemple 2 :

S 355

JR

+ AR

K2

+ M

S : « Structural »
Acier de construction

Limite d'élasticité
fy en MPa

Qualité de l'acier

Etat de livraison

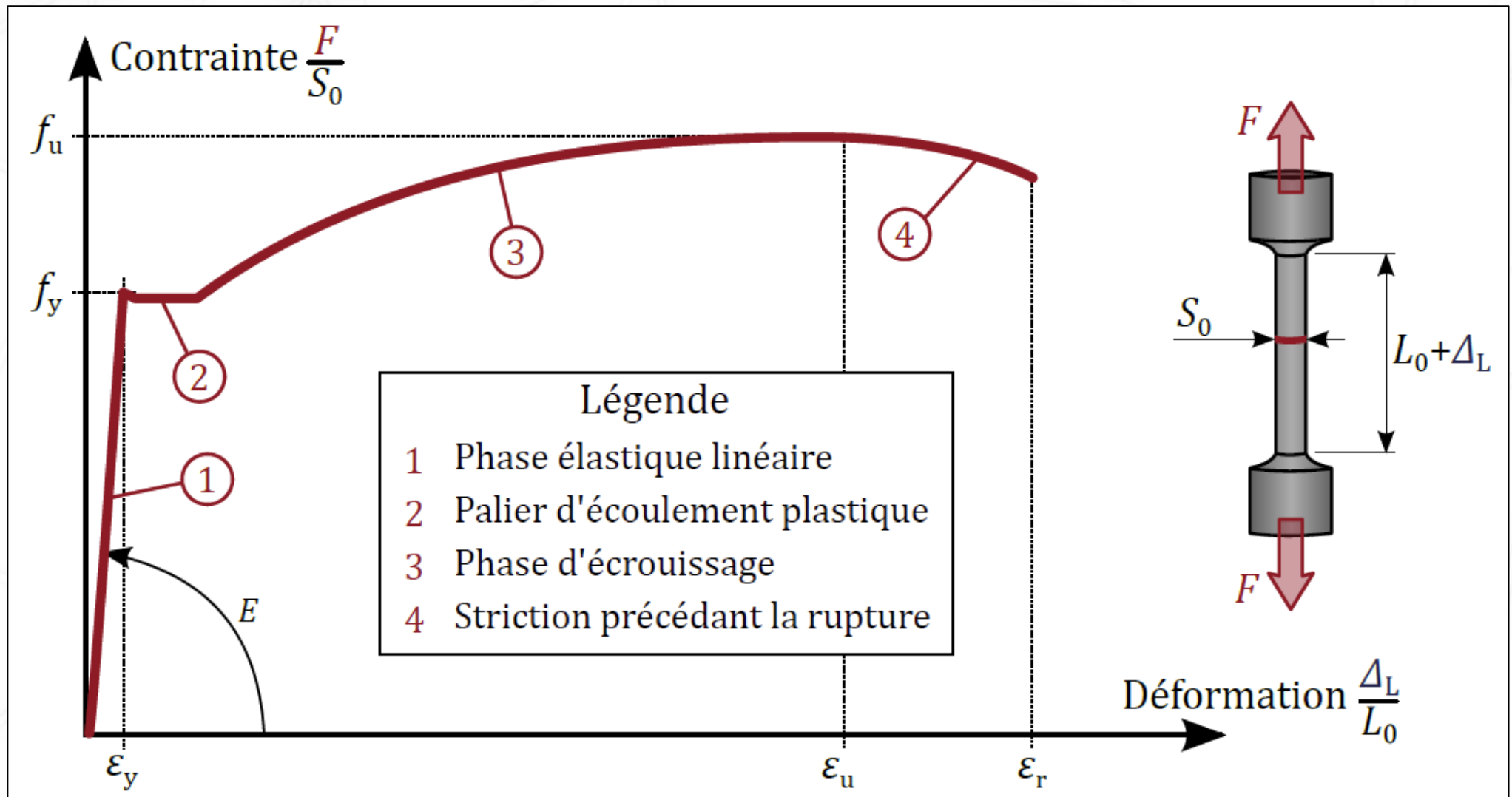


Figure x : Courbe contrainte-déformation pour un acier de construction courant

- ❑ La phase élastique linéaire (1) où la contrainte croît proportionnellement à la déformation (Loi de Hooke) et où les déformations subies par l'éprouvette sont réversibles.
- ❑ Le palier d'écoulement plastique (2) marque la fin de la proportionnalité entre contrainte et déformation et le début des déformations plastiques irréversibles (pour certains aciers, le passage à la phase d'écrouissage se produit sans palier plastique marqué).
- ❑ La phase d'écrouissage (3) correspond à une augmentation progressive de la contrainte mesurée, accompagnée d'un accroissement des déformations irréversibles.
- ❑ La phase de striction (4) correspond à la rupture progressive, où les déformations se concentrent sur une faible portion de l'éprouvette dans laquelle la section se réduit localement avant que l'arrachement des fibres ne se produire (rupture).



- ❑ Les aciers utilisés en construction métallique doivent présenter une bonne ductilité, pour limiter les risques de rupture brutale, et une bonne soudabilité.
- ❑ Les nuances les plus couramment employées sont le S235, le S275 et le S355, d'après leur désignation suivant la norme européenne NF EN 10025. Le symbole « S » pour Structural suivi de la limite d'élasticité minimale (en N/mm² ou MPa) pour la gamme d'épaisseur la plus faible.

Nuances	Limite d'élasticité minimale R_e ou f_y en MPa		Résistance à la traction ⁽¹⁾ R_m ou f_u en MPa
	ep. ≤ 16 mm	$16 \text{ mm} < \text{ep.} \leq 40$ mm	ep. ≤ 40 mm
S235	235	225	360
S275	275	265	370
S355	355	345	470
S460	460	440	540
⁽¹⁾ Valeur minimale disponible dans les parties 2, 3 et 4 de l'EN 10025 [5]			

Principales nuances d'acier utilisées en construction métallique



- ❑ La réduction des caractéristiques mécaniques en fonction de l'épaisseur doit, en règle générale, être pris en compte pour le dimensionnement de l'ossature, mais certains codes de calcul tolèrent le fait de négliger certains paliers. Par exemple, négliger le palier entre 16 et 40mm pour la limite d'élasticité génère une erreur de 4%, ce qui est généralement acceptable pour les applications courantes.

Nuance d'acier NF EN 10025-2 -3 ou -4	$t \leq 40 \text{ mm}$	
	$f_y \text{ [N/mm}^2\text{]}$	$f_u \text{ [N/mm}^2\text{]}$
S235	235	360
S275	275	430
S275 N/NL	275	390
S275 M/ML	275	370
S355	355	490
S355 N/NL	355	490
S355 M/ML	355	470



Principales nuances d'acier utilisées en construction métallique

❑ L'essai de flexion par choc, aussi appelé essai Charpy, consiste à frapper une éprouvette avec un mouton-pendule de masse et de hauteur calibrées. L'éprouvette est appuyée sur ses bords et entaillée en son milieu, de façon à favoriser la rupture. L'éprouvette est détruite au moment du choc, tandis que le pendule continue sa course jusqu'à une hauteur maximale d'arrivée; la différence entre cette dernière et sa hauteur de départ est représentative de l'énergie absorbée par l'éprouvette.

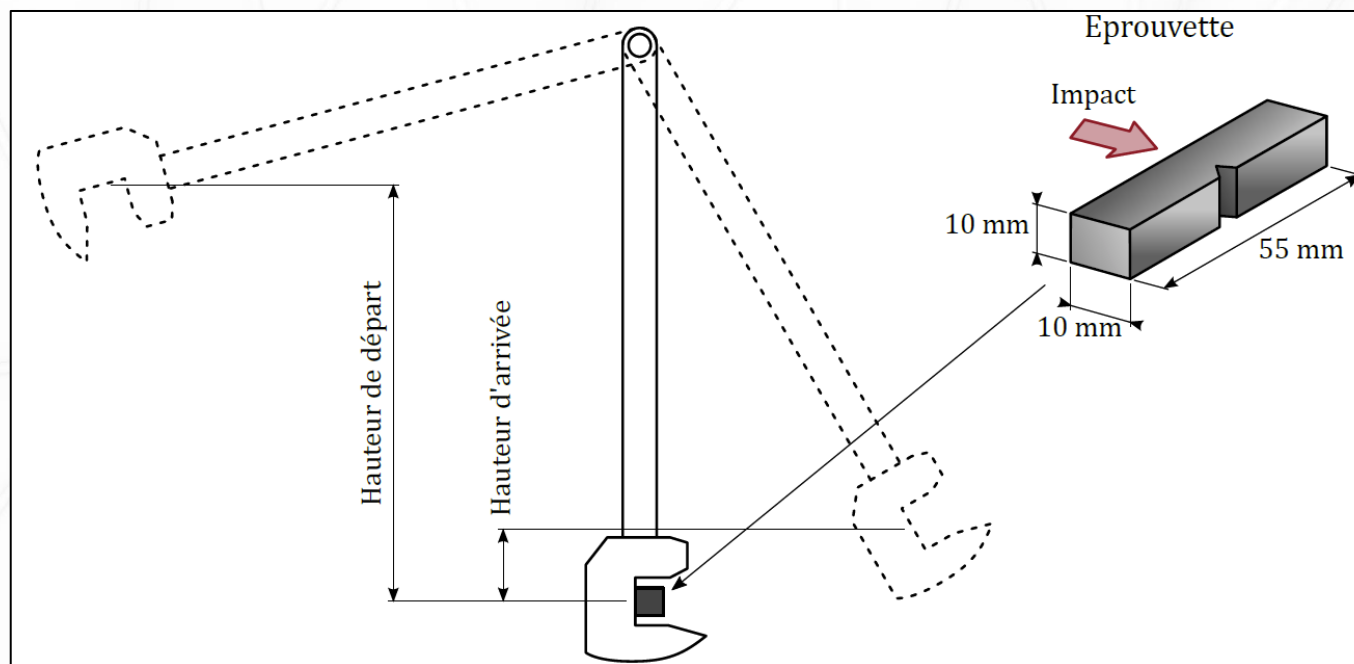


Figure x : Dispositif d'essai de flexion par choc (mouton-pendule ou mouton Charpy)

□ On distingue trois zones dans cette courbe obtenue via l'essai :

- Zone de rupture fragile (1) : l'énergie absorbée par l'éprouvette est faible.
- Zone de transition (2) : l'énergie absorbée par l'éprouvette varie rapidement en fonction de la température.
- Zone de rupture ductile (3) : l'énergie absorbée par l'éprouvette est élevée.

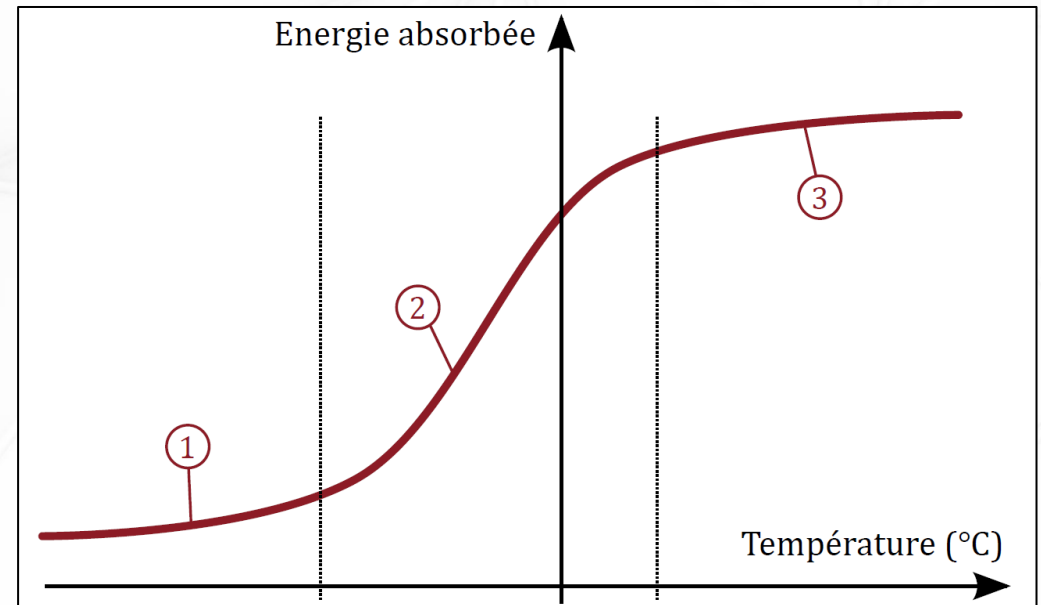


Figure x : Courbe énergie de rupture - température

- Pour les aciers de construction courants, l'énergie minimale exigée est de 27 joules (ou 40 joules dans certains cas moins fréquents) et les températures d'essais de 20, 0 ou -20°C.

- ❑ L'essai de flexion par choc est un procédé simple permettant de caractériser une autre propriété importante de l'acier : sa résilience.
- ❑ Un matériau ductile comme l'acier peut absorber une quantité appréciable d'énergie en se déformant dans le domaine plastique, mais ce bon comportement est très dépendant de la température à laquelle l'essai est réalisé.
- ❑ Utiliser un acier présentant une résilience élevée permet de réduire le risque de rupture fragile.

Qualité	Essai de flexion par choc	
	Energie	Température
JR	27 Joules	+20 °C
J0	27 Joules	0 °C
J2	27 Joules	-20 °C
K2	40 Joules	-20 °C

Qualités d'acier les plus courantes





□ Les principales caractéristiques des aciers de construction :

- Poids volumique : $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Module de Young : $E = 210\,000 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$
- Module de cisaillement : $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 81\,000 \text{ MPa}$
- Contrainte limite élastique de cisaillement pur : $\tau_e = \frac{f_y}{\sqrt{3}}$
- Coefficient de réduction élastique de l'acier : $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
- Coefficient de dilatation thermique : $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Pour $T < 100^\circ\text{C}$)
- Température de fusion : $\approx 1500^\circ\text{C}$

❑ Aciers d'usage général :

- Norme : NF EN 10025-2
- Leur limite d'élasticité et leur résistance à la traction sont fonction de leur teneur en carbone
- La teneur en carbone reste toutefois modérée pour garantir un minimum de ductilité (entre 0,17 et 0,2 max selon la nuance)
- L'état de livraison (traitement thermique) est laissé au choix du constructeur
 - État de livraison +AR (brut de laminage), +N ou +M
- Nuances principales : S235, S275, S355
- Qualités disponibles : JR, JO, J2 ou K2

❑ Aciers à grains fins :

- Norme : NF EN 10025-3 et NF EN 10025-4
- Les aciers sont livrés à l'état normalisé (+N) ou obtenues par laminage thermomécanique (+M) ce qui permet d'avoir une structure à grains fins :
 - Qui améliore la limite d'élasticité et la résilience
 - Qui permet de diminuer la teneur en carbone et donc d'améliorer la soudabilité
- Nuances principales : S275, S355, S420, S460
- Qualités disponibles :
 - A l'état normalisé : N et NL
 - En laminage thermomécanique : M et ML

❑ Aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique :

- Norme : NF EN 10025-5
- Ils contiennent certains éléments d'alliage (P, Cu, Cr, ...) qui permettent d'augmenter la résistance à la corrosion atmosphérique par la formation d'une couche auto-protectrice d'oxydes sous l'influence des conditions atmosphériques
- Autres appellations : aciers patinables, aciers Corten
- L'état de livraison (traitement thermique) est laissé au choix du constructeur
- Nuances principales : S235, S355
- Qualités disponibles : J0W, J2W, K2W
 - W : Weathering steel

❑ Aciers trempé-revenus :

- Norme : NF EN 10025-6
- Les aciers sont livrés à l'état trempé et revenu ce qui permet d'avoir une structure martensitique revenue qui confère une haute limite d'élasticité (aciers HLE)
- La teneur en carbone reste modérée pour garantir une bonne ductilité (0,20 à 0,22 max selon la nuance)
- La trempabilité est assurée par l'addition d'éléments d'alliage en faible teneur
- Nuances principales : S460, S500, S550, S620, S690, S890, S960
- Qualités disponibles : Q, QL

□ NF EN 10025 Aciers de construction :

- Partie 1 Conditions Techniques générales de Livraison (CTL)
- Partie 2 CTL des aciers de construction non alliés
- Partie 3 CTL des aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé/laminage normalisant
- Partie 4 CTL des aciers de construction soudables à grains fins obtenus par laminage thermomécanique
- Partie 5 CTL des aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique
- Partie 6 CTL des tôles et larges plats en aciers de construction à haute limite d'élasticité à l'état trempé et revenu

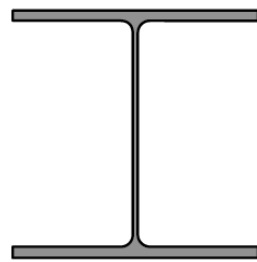
❑ Les profilés ouverts laminés à chaud



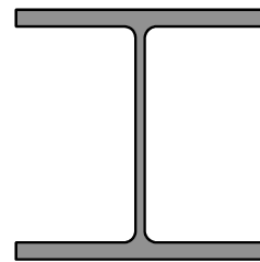
IPE



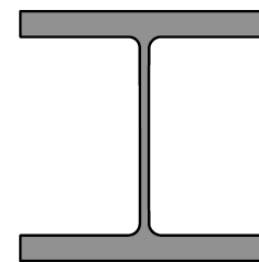
IPN



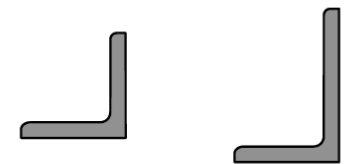
HEA



HEB



HEM



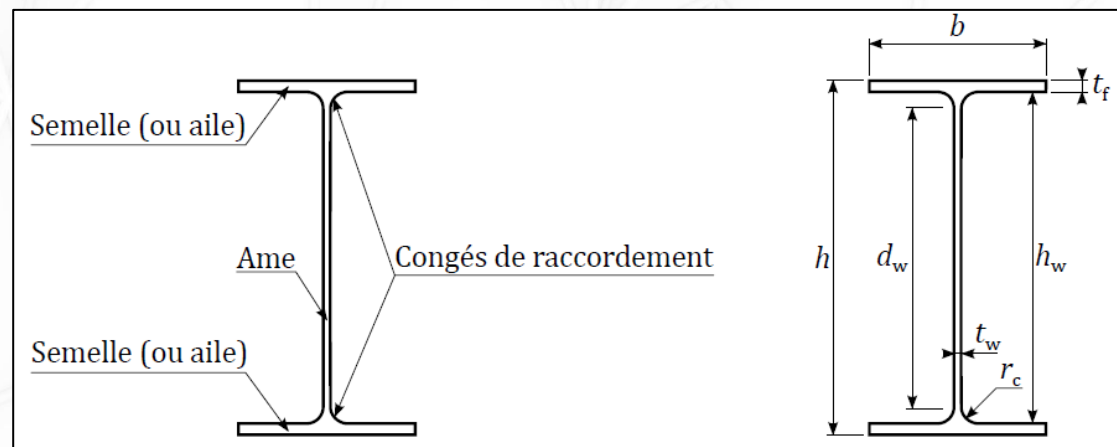
Cornières à ailes
égales ou inégales



UPE



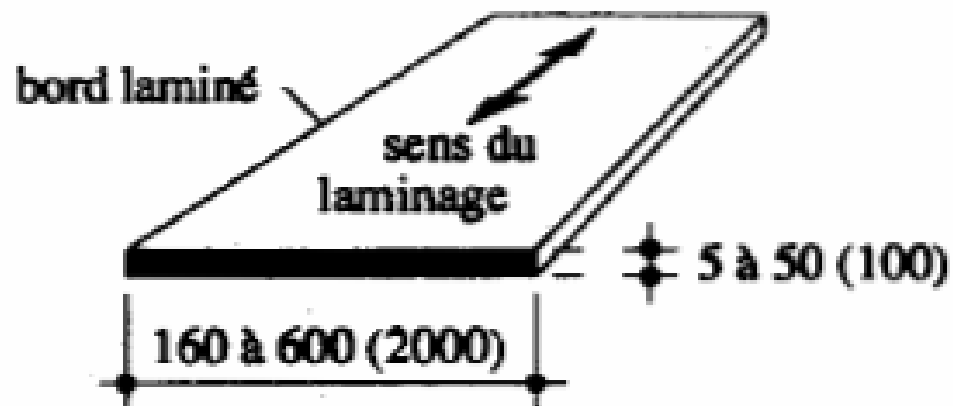
UPN



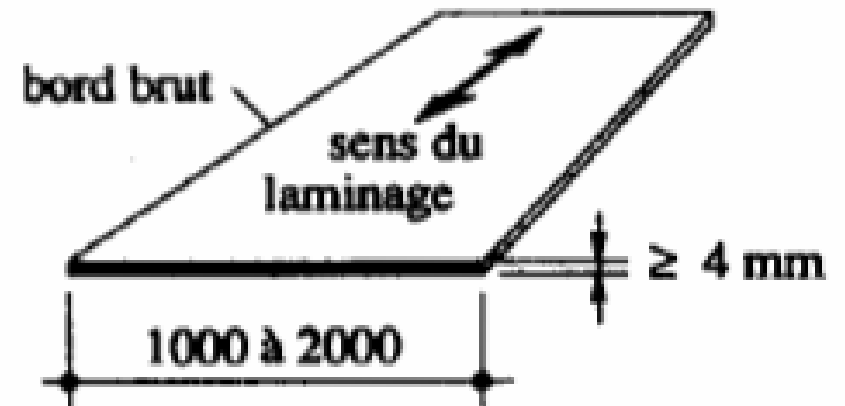
❑ **Les tôles et larges plats** : qui subissent en général un laminage à froid supplémentaire, à l'exception des tôles de forte épaisseur (tôles, bardages, profils minces, profils creux...)

- Poutres reconstituées soudées (PRS)
- Attaches (platines, éclisses)

Larges plats FLB

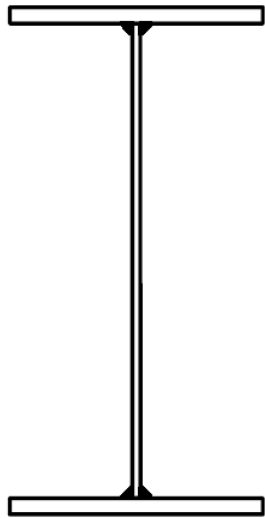


Tôles BLE



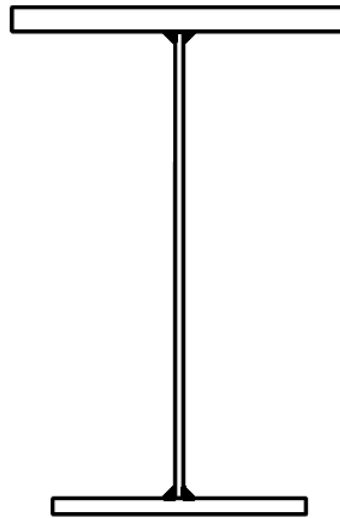
❑ Les profilés reconstitués soudés (PRS) :

- Profils métalliques reconstitués par différentes tôles
- Les épaisseurs de tôles sont choisies afin d'optimiser le poids d'acier



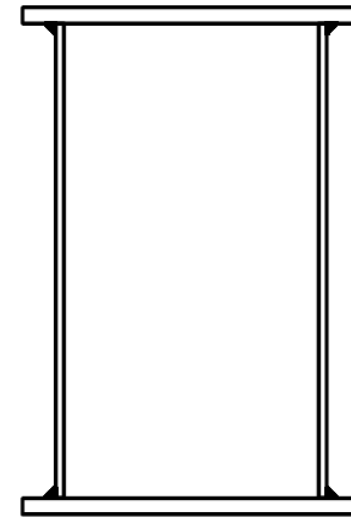
(a)

Profils en I, H symétriques



(b)

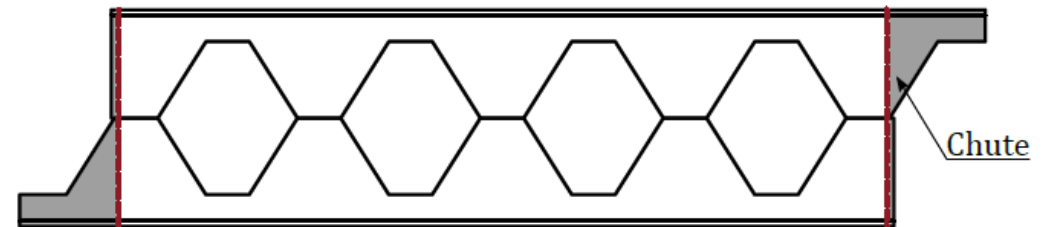
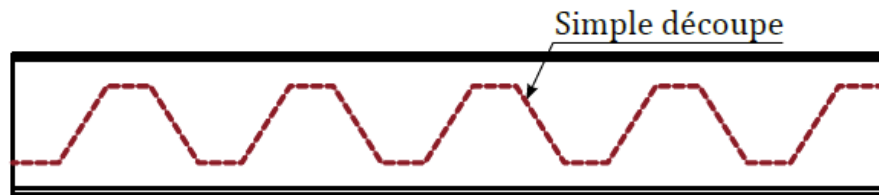
Profils dissymétriques



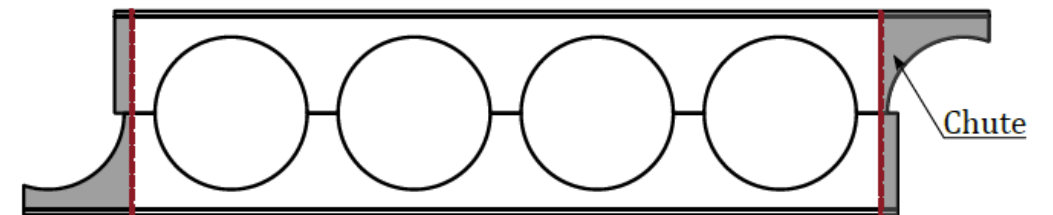
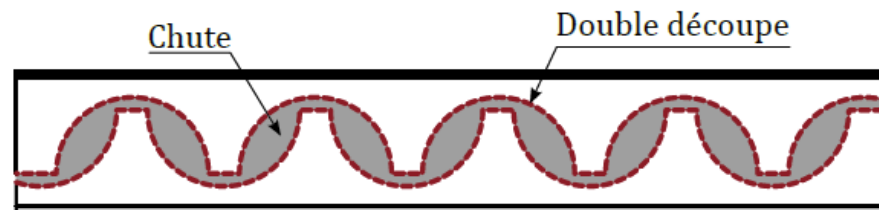
(c)

Caissons

❑ Les poutres alvéolaires



(a) Poutre alvéolaire à ouvertures polygonales

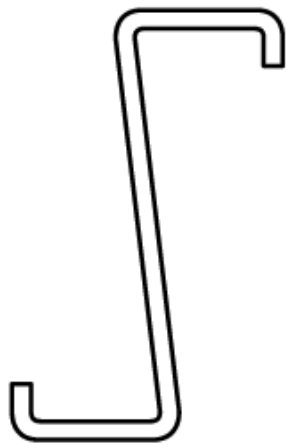


(b) Poutre alvéolaire à ouvertures circulaires

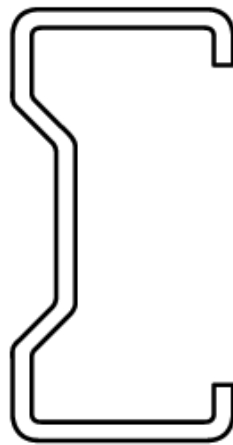
- ❑ **Les profilés minces formés à froid** : Les tôles minces galvanisées (d'épaisseur inférieure à 5 mm) peuvent être profilées à froid pour réaliser des profils minces. De sections très diverses, les profils minces sont utilisés en serrurerie, en menuiserie métallique et en ossatures légères : pannes de charpente, ossatures de murs ou de cloisons, de faux plafond...



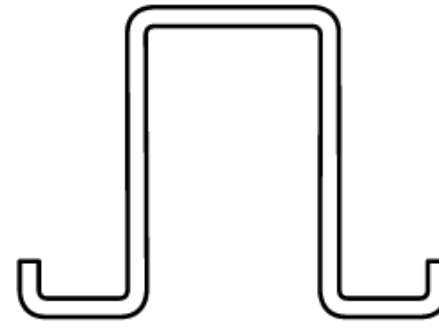
C



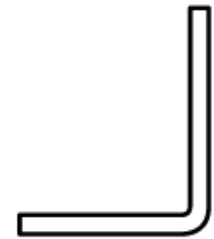
Z



Σ (sigma)



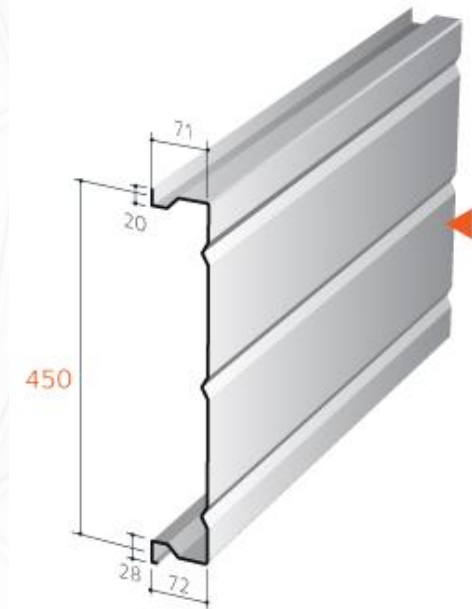
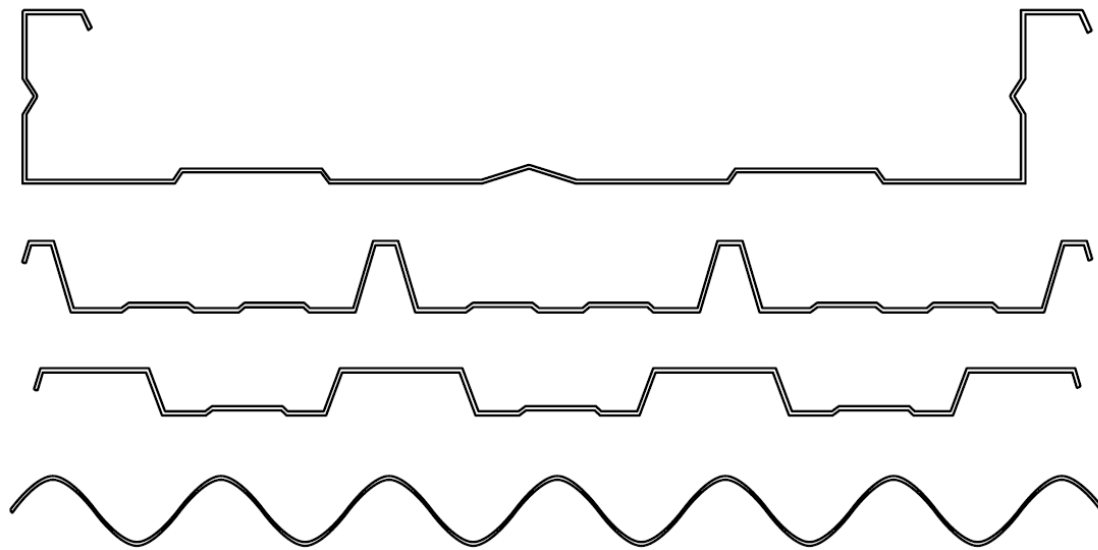
Ω (oméga)



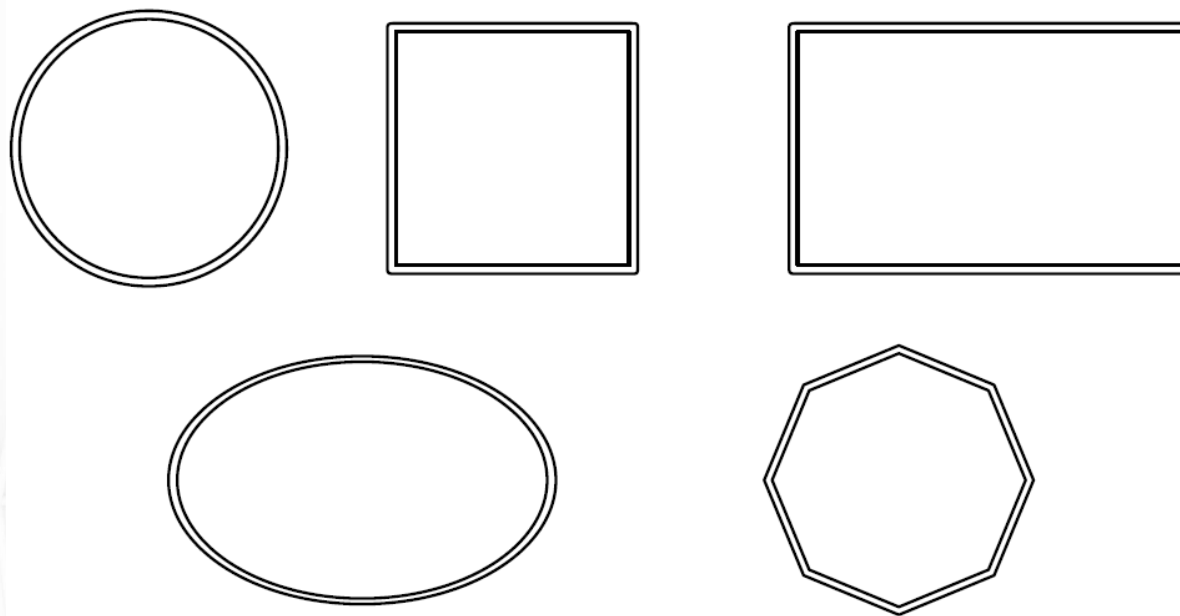
Cornière

❑ Les tôles nervurées :

- Ce sont des tôles minces que l'on nervure par profilage à froid à l'aide d'une machine à galets. Les tôles nervurées sont issues de bobines galvanisées et souvent prélaquées.
- Les applications concernent les produits d'enveloppe (bardage), de couverture (bac, support d'étanchéité) et de plancher (bac pour plancher collaborant ou à coffrage perdu), ainsi que les panneaux sandwich incorporant des matériaux isolants.

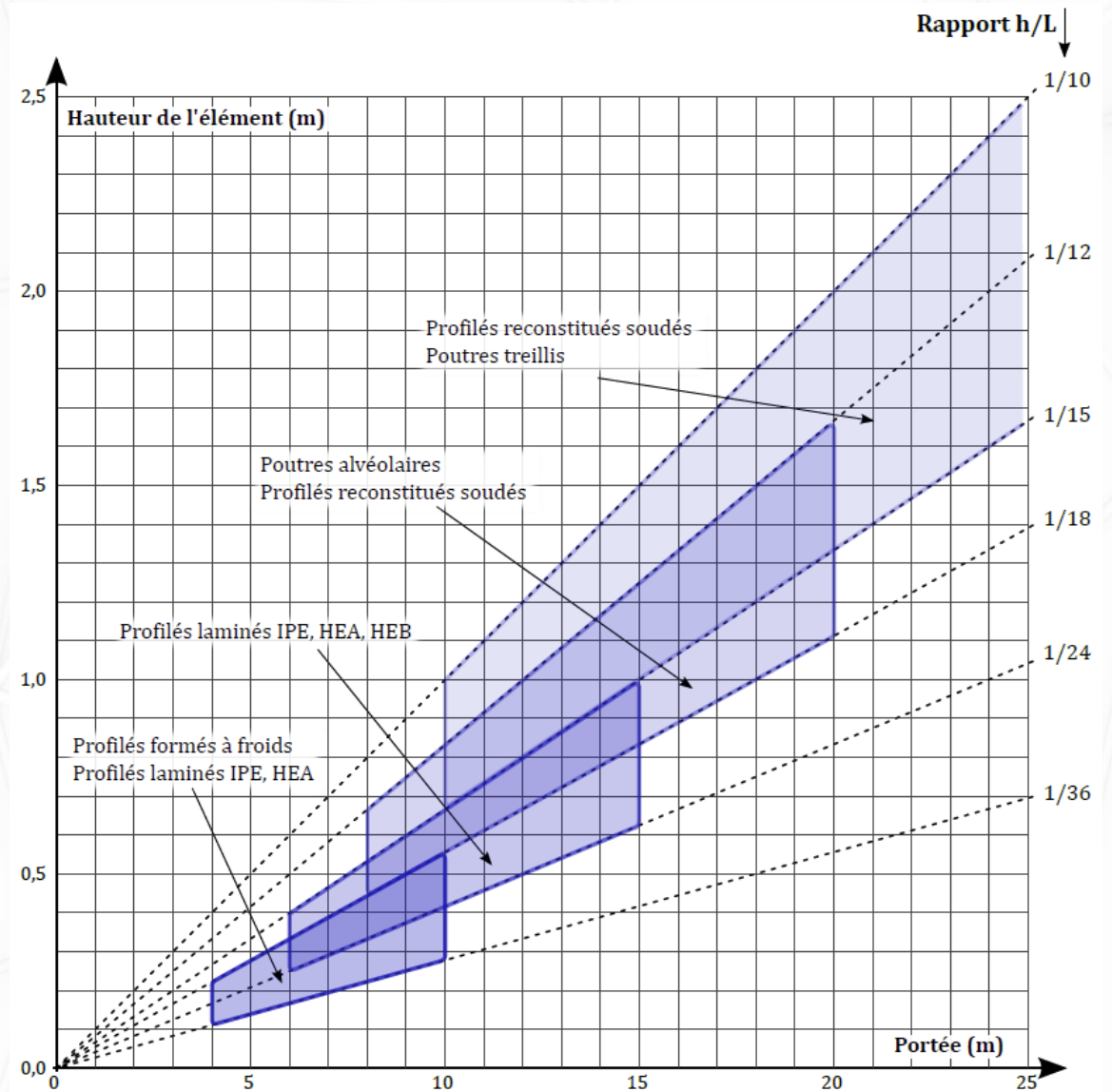


- ❑ **Les profils creux** : Les tubes de construction sont appelés « profils creux ». Ils sont fabriqués en continu à partir de tôles minces ou moyennes repliées dans le sens de leur longueur.



GAMMES D'USAGES - PROFILS METALLIQUES (ELEMENTS FLECHIES)

Cet abaque synthétise les gammes d'usage habituel des différents procédés constructifs lorsqu'ils sont utilisés pour des éléments fléchies



Grand avantage de l'acier : sa résistance à la traction !

- Exemple : Calcul de la résistance à la traction d'une cornière à ailes égales L50x50x5 en S235

$$A_{L50 \times 5} = 4,8 \text{ cm}^2 \quad f_y = 235 \text{ MPa}$$

$$N_{pl} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{480 \text{ mm}^2 \times 235 \text{ MPa}}{1} = 112\,800 \text{ N} \approx 11,28 \text{ To}$$

- NF EN 1993-1-1 - Règles générales et règles pour les bâtiments
- NF EN 1993-1-2 - Règles générales - Calcul du comportement au feu
- NF EN 1993-1-3 - Règles générales - Règles supplémentaires pour les profilés et plaques formés à froid
- NF EN 1993-1-4 - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables
- NF EN 1993-1-5 - Plaques planes
- NF EN 1993-1-6 - Résistance et stabilité des structures en coques
- NF EN 1993-1-7 - Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des plaques raidies chargées hors de leur plan
- NF EN 1993-1-8 - Calcul des assemblages
- NF EN 1993-1-9 - Fatigue
- NF EN 1993-1-10 - Choix des qualités d'acier
- NF EN 1993-1-11 - Calcul de structures à câbles ou éléments tendus
- NF EN 1993-1-12 - Règles additionnelles pour l'utilisation de l'EN 1993 jusqu'à la nuance d'acier S 700

- NF EN 1993-2 - Partie 2 : Ponts métalliques
- NF EN 1993-3-1- Tours, mâts et cheminées - Pylônes et mâts haubanés
- NF EN 1993-3-2 - Tours, mâts et cheminées - Cheminées
- NF EN 1993-4-1 - Silos, réservoirs et canalisations
- NF EN 1993-4-2 - Réservoirs
- NF EN 1993-4-3 - Canalisations
- NF EN 1993-5 - Pieux et palplanches
- NF EN 1993-6 - Chemins de roulement

Grandeurs à mesurer	Unités pratiques	Unités théoriques	Equivalence
Efforts	daN kN	N N	1 daN = 10 N 1 kN = 10 ³ N
Longueurs	mm	m	1 mm = 10 ⁻³ m
Sections	mm ²	m ²	1 mm ² = 10 ⁻⁶ m ²
Moments fléchissants	daN.m kN.m	Nm Nm	1 daNm = 10 Nm 1 kNm = 10 ³ Nm
Moments statiques	cm ³	m ³	1 cm ³ = 10 ⁻⁶ m ³
Moments d'inertie	cm ⁴	m ⁴	1 cm ⁴ = 10 ⁻⁸ m ⁴
Contraintes	daN/mm ² N/mm ²	N/m ² = Pa N/m ² = Pa	1 daN/mm ² = 10 ⁷ Pa 1 N/mm ² = 1 MN/m ² = 1 MPa
Surcharges	daN/m ² kN/m ²	N/m ² = Pa N/m ² = Pa	1 daN/m ² = 10 Pa 1 kN/m ² = 10 ³ Pa = 1 kPa